

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

Anderson Cristiano Rolim

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE  
MATERIAL FRESADO ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND,  
CAL E ROCHA BASÁLTICA PULVERIZADA PARA EMPREGO EM  
PAVIMENTAÇÃO**

Santa Maria, RS  
2020



**Anderson Cristiano Rolim**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MATERIAL  
FRESADO ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND, CAL E ROCHA  
BASÁLTICA PULVERIZADA PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tatiana Cureau Cervo

Santa Maria, RS  
2020

ROLIM, Anderson Cristiano

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE  
MATERIAL FRESADO ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND, CAL  
E ROCHA BASÁLTICA PULVERIZADA PARA EMPREGO EM  
PAVIMENTAÇÃO / Anderson Cristiano ROLIM.- 2020.

147 p.; 30 cm

Orientador: Tatiana Cureau CerVO CERVO

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2020

1. Reciclagem de pavimento asfáltico (fresado) com pó  
de rocha e adições de cimento Portland e cal I. CERVO,  
Tatiana Cureau CerVO II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

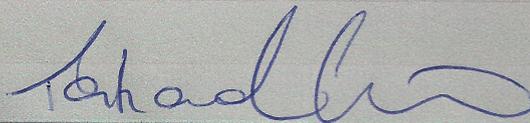
Declaro, ANDERSON CRISTIANO ROLIM, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Anderson Cristiano Rolim

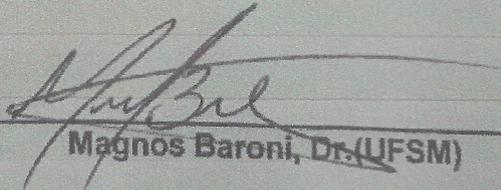
**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MATERIAL  
FRESADO ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND, CAL E ROCHA  
BASÁLTICA PULVERIZADA PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

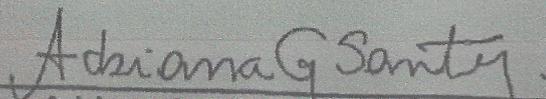
Aprovado em 17 de dezembro de 2020



Tatiana Cureau Cervo, Dr<sup>a</sup>. (UFSM)  
(Presidente/Orientadora)



Magnos Baroni, Dr. (UFSM)



Adriana Goulart dos Santos, Dr<sup>a</sup>. (UDESC)

Santa Maria, RS  
2020



## **DEDICATÓRIA**

À minha esposa Morgana e a minha filha Maria Vitória, que nasceu durante o Curso, as quais desde o início deste sonho pessoal me apoiaram com carinho e tiveram compreensão nos dias que não pude estar junto com elas e relevaram muitos anseios e angústias, superados graças ao amor recebido delas.

Aos meus pais, Sílvia e Clóvis, pela dedicação e por terem me propiciado um ambiente familiar carinhoso e saudável.

À minha irmã Rita a que em diversos momentos me acalmou e me ajudou na elaboração deste trabalho.

À minha sogra Cleci e ao meu sogro Antônio pelos conselhos e momentos de desabafo.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao findar esta etapa de grande aprendizado, agradeço:

- primeiramente a Deus, que me iluminou neste caminho, e me deu forças para ir em frente e alcançar meus objetivos;

- à minha orientadora, professora Tatiana Cureau Cervo, por ter acreditado em mim e me dado a oportunidade da realização deste sonho. Mesmo sem me conhecer, acreditou que eu poderia realizar este trabalho nesta grande área que é a pavimentação;

- aos professores que durante as disciplinas me propiciaram o aprendizado mais aprofundado na área de pavimentação e geotecnia;

- aos meus amigos do Laboratório GEPPASV Lucas Bueno, Sílvio, Fernando Boeira, Chaveli, Ana Helena, Luzzi e em especial ao Marcos que me apresentou diversas pessoas que em seguida me auxiliaram neste trabalho, além de passar seus conhecimentos e auxiliar na elaboração do mesmo;

- ao Laboratorista da UNIJUI, o Luiz, que me auxiliou nos ensaios realizados e na confecção dos CPs;

- há um grande amigo que me ajudou a confeccionar mais de 600 CPs, estagiário da SMEd (Secretária Municipal de Educação de Ijuí), hoje Engenheiro Civil Gustavo Battisti; e

- todos os integrantes do LMCC, PPGEC e à própria instituição UFSM, o meu sincero obrigado pelo apoio e voto de confiança nesta etapa da minha vida.



## RESUMO

### AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MATERIAL FRESADO ESTABILIZADO COM CIMENTO PORTLAND, CAL E ROCHA BASÁLTICA PULVERIZADA PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO

AUTOR: Anderson Cristiano Rolim  
ORIENTADORA: Tatiana Cureau Cervo

A preocupação com a preservação ambiental juntamente com o crescimento econômico busca cada vez mais a reutilização de materiais descartados na indústria da construção como fonte de matéria prima para novas obras. A reciclagem de materiais descartados providos de recuperação ou manutenção de rodovias pode contribuir para uma economia e sustentabilidade em obras viárias. Além disso, sua reutilização colaboraria na diminuição de custos relativos ao transporte de matéria prima e diminuição da extração de materiais virgens da natureza. Métodos estão sendo desenvolvidos para a utilização do material fresado originado da retirada de revestimentos antigos para aplicação em novas camadas de pavimentos, como consta em literaturas internacionais *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), a qual descreve a aplicação de material fresado em estruturas de bases ou sub-bases de pavimentos. Desse modo o reaproveitamento de material fresado oriundo de manutenção de pavimentos asfálticos vem cada vez mais sendo tema de pesquisas no mundo acadêmico, na busca de sua reutilização. Entretanto, para que seja possível a utilização de tal material em obras viárias, faz necessário um método racional de dosagem de misturas como o existente para concretos. Dessa maneira, este trabalho tem como objetivo determinar a influência da quantidade de cimento (percentual) e adições da cal (percentual). Em uma mistura de material fresado com pó de pedra, avaliando seus Índices de Vazios, Absorção e Massa Específica, para assim, ter parâmetros de dosagem e avaliar a influência das relações vazios/material cimentante na estimativa da sua resistência sobre a mistura de material fresado e pó de pedra com diferentes teores de cimento e adição da cal. As avaliações serão realizadas por meio de ensaios laboratoriais: Ensaio de Caracterização (Análise Granulométrica, Extração de Betume, Rice e Compactação), Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), Resistência à Tração na Flexão (RTF), Módulo de Resiliência (MR). Serão realizados todos os ensaios supracitados na mistura de referência composta com agregado natural e nas misturas estabilizadas. Os teores de cimento utilizados serão de 4% e 5%, com adição da cal em teores 3% e 6%. A compactação dos corpos de prova será realizada na energia normal, intermediária e modificada, sendo os ensaios realizados aos 7 e 91 dias de cura. Ainda serão realizadas correlações entre as propriedades mecânicas e as características das misturas através da relação  $\eta/C_{i\%}$  que busquem prever as resistências e módulos para todas as misturas estudadas. Dessa forma, tornando possível a aplicação dos traços em obras de pavimentação, a partir da dosagem do material cimentante e sua compactação.

**Palavras-chave:** Base cimentada. Fresado Asfáltico. Estabilização granulométrica e química. Pavimentação. Resistências mecânicas.



## ABSTRACT

### EVALUATION OF MECHANICAL RESISTANCE PARAMETERS OF MILLED MATERIAL STABILIZED WITH PORTLAND CEMENT, QUICKLIME AND SPRAYED ROCK TO BE USED IN PAVING

AUTHOR: Anderson Cristiano Rolim

ADVISOR: Tatiana Cureau Cervo

The concern with environmental preservation together with economic growth is increasingly seeking the reuse of discarded materials in the construction industry as a source of raw material for new works. The recycling of discarded materials from the recovery or maintenance of highways can contribute to the economy and sustainability in road works. Besides, its reuse would collaborate in the reduction of the costs related to the transportation of raw materials and the decreased extraction of virgin materials from nature. Methods are being developed for the use of milled material originated from the removal of old claddings for application in new pavement layers, as shown in international literature Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), which describes the application of milled material in structures of bases or sub-bases of pavements. In this way, the reuse of milled material from the maintenance of asphalt pavements is increasingly being the subject of research in the academic world, in search of its reuse. However, to be able to use that material in road works, a rational method of dosing mixtures, as the existing one for concretes, is necessary. In this way, this study aims to measure the influence of the amount of cement (percentage) and additions of quicklime (percentage), in a mixture of milled material with stone powder, evaluating their Void Index, Absorption and Specific Mass. Therefore, it is possible to obtain dosage parameters and to evaluate the influence of the relationship between voids and cementing material in the estimation of its resistance on the mixture of milled material and stone powder with different cement contents and also the addition of quicklime. The evaluations will be performed through laboratory tests: Tests for Characterizing (Particle Size Analysis, Extraction of Bitumen, Rice and Compaction), Unconfined Compressive Strength, Splitting Tensile Strength by Diametrical Compression, Flexural Tensile Strength and Resilient Modulus. All aforementioned trials also will be performed in the reference mixture composed of natural aggregates. The cement contents used in the study will be 4% and 5%, with quicklime added with its contents as 3% and 6%. The compaction of the specimens will be performed in standard, intermediate and modified energies, with the trials done in the 7th and 91st day curing period. Correlations will also be made between the mechanical properties with the characteristics of the mixtures through  $\eta/C_{i\%}$  seeking to visualize resistances and modules for all studied mixtures. In this way, making it possible to apply the strokes in paving works, from the dosage of the cementitious material and its compaction.

**Keywords:** Milled material. Percentage. Mechanical properties



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Faixas granulométricas de execução de BGS – DNIT141/2010-ES .....	27
Figura 2 – Esforços em pavimentos rígidos e flexíveis .....	28
Figura 3 – Mudanças estruturais de pavimentos flexíveis com base cimentada. ....	44
Figura 4 – Mecanismos de falhas de camadas cimentada.....	45
Figura 5 – Carregamento/Repouso do ensaio MR .....	64
Figura 6 – Tensões e momento da configuração de quatro pontos .....	65
Figura 7 – Fluxograma da pesquisa .....	69
Figura 8 – Material fresado utilizado e localização.....	72
Figura 9 – Armazenamento do material fresado .....	72
Figura 10 – Fresadora modelo Wirtgen W 100f.....	73
Figura 11 – Curva granulométrica do RAP.....	74
Figura 12 – Imagem de agregados após o ensaio de Rotarex.....	75
Figura 13 – Ensaio de equivalência de areia.....	77
Figura 14 – Curva granulométrica das misturas.....	79
Figura 15 – Mistura de fresado e pó-de-pedra .....	81
Figura 16 – (A) pesagem amostra úmida e (B) Pesagem de amostra seca (estufa);	82
Figura 17 – Curvas de compactação Proctor.....	82
Figura 18 – Moldes utilizados: A) ensaio RTF; B) ensaio RCS e C) ensaio RTCD/MR .....	84
Figura 19 – Cura dos CPs .....	85
Figura 20 – Desmoldagem e verificações de aceitação de CPs .....	85
Figura 21 – Prensa hidráulica utilizada para a RCS.....	87
Figura 22 – Prensa UTM-25 para RTCD.....	87
Figura 23 – Desmoldagem de CPs para RTCD e MR e conferencia de aceitação ...	88
Figura 24 – CP durante ensaio de RTCD.....	88
Figura 25 – Ensaio de Módulo de Resiliência .....	89
Figura 26 – Configuração para ensaio RTF .....	90
Figura 27 – Cura de CPs do ensaio de RTF .....	90
Figura 28 – CPs de RTF antes do rompimento .....	91
Figura 29 – Rompimento de CPs do ensaio de RTF.....	91
Figura 30 – Valores de Resistência a Compressão Simples aos 7 dias de cura .....	95
Figura 31 – Valores de Resistência a Compressão Simples aos 91 dias de cura.....	95

Figura 32 – Valores de Resistência a Tração na Flexão aos 7 dias de cura .....	98
Figura 33 – Valores de resistência a tração na flexão aos 91 dias de cura .....	98
Figura 34 – Valores de RTCD aos 7 dias de cura em relação às densidades.....	101
Figura 35 – Valores de RTCD aos 91 dias de cura em relação às densidades.....	101
Figura 36 – Valores de MR aos 7 dias de cura em relação às densidades .....	102
Figura 37 – Valores de MR aos 91 dias de cura em relação às densidades .....	102
Figura 38 – Valores de RCS aos 7 dias de cura em relação à porosidade.....	104
Figura 39 – Valores de RCS aos 91 dias de cura em relação à porosidade.....	105
Figura 40 – Valores de RTF aos 7 dias de cura em relação à porosidade .....	105
Figura 41 – Valores de RTF aos 91 dias de cura em relação à porosidade .....	106
Figura 42 – Valores de RTCD aos 7 dias de cura em relação à porosidade .....	106
Figura 43 – Valores de RTCD aos 91 dias de cura em relação à porosidade .....	107
Figura 44 – Valores de MR aos 7 dias de cura em relação à porosidade .....	107
Figura 45 – Valores de MR aos 91 dias de cura em relação à porosidade.....	108
Figura 46 – RCS relacionado $\eta/Ci\%$ para o período de cura de 7 dias.....	110
Figura 47 – RCS relacionado $\eta/Ci\%$ para o período de cura de 91 dias.....	111
Figura 48 – RTF relacionado $\eta/Ci\%$ para o período de cura de 7 dias .....	111
Figura 49 – RTF relacionado $\eta/Ci\%$ para o período de cura de 91 dias .....	112
Figura 50 – RTCD relacionado $\eta/Ci\%$ para o período de cura de 7 dias .....	112
Figura 51 – RTCD relacionado $\eta/Ci\%$ para o período de cura de 91 dias .....	113
Figura 52 – MR relacionado $\eta/Ci\%$ para o período de cura de 7 dias.....	113
Figura 53 – MR relacionado $\eta/Ci\%$ para o período de cura de 91 dias.....	114
Figura 54 – Relação entre RCS e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de cimento aos 7 dias .....	117
Figura 55 – Relação entre RCS e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de cimento aos 91 dias .....	118
Figura 56 – Relação entre RTCD e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de cimento aos 7 dias .....	118
Figura 57 – Relação entre RTCD e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de cimento aos 91 dias .....	119
Figura 58 – Relação entre RTF e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de cimento aos 7 dias .....	119

Figura 59 – Relação entre RTF e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de cimento aos 91 dias.....	120
Figura 60 – Relação entre MR e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de cimento aos 7 dias .....	121
Figura 61 – Relação entre MR e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de cimento aos 91 dias.....	121
Figura 62 – Relação entre RCS e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de material cimentício .....	124
Figura 63 – Relação entre RTF e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de material cimentício .....	124
Figura 64 – Relação entre RTCD e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de material cimentício .....	125
Figura 65 – Relação entre MR e $\eta/Ci\%$ para diferentes teores de material cimentício.....	125



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre as especificações de execução de BGS .....	26
Tabela 2 – Especificações de execução de BGTC .....	31
Tabela 3 – Faixas granulométricas para execução de BGTC .....	31
Tabela 4 – Características e Normatizações do cimento Portland .....	32
Tabela 5 – Pesquisa com o uso do cimento Portland em pavimentação .....	33
Tabela 6 – Características de resistência e cura do cimento Portland.....	33
Tabela 7 – Composição média das cales brasileiras .....	34
Tabela 8 – Umidade ótima e energias de compactação usadas .....	38
Tabela 9 – RCS aos 7 dias de cura para material reciclado. ....	45
Tabela 10 – Faixas granulométricas de misturas com material reciclado. ....	45
Tabela 11 – RCS e MR para camadas cimentadas aos 28 dias de cura .....	46
Tabela 12 – RCS aos 7 dias de cura.....	49
Tabela 13 – Análise dos métodos internacionais citados .....	52
Tabela 14 – Resultados de Paiva e Oliveira (2010) .....	55
Tabela 15 – Análise dos métodos internacionais citados .....	56
Tabela 16 – Comparativo entre normas nacional e internacional.....	65
Tabela 17 – Detalhamento e dos Corpos de Prova.....	71
Tabela 18 – Teor de betume .....	74
Tabela 19 – Densidade teórica encontradas .....	76
Tabela 20 – Resultado da média das granulometrias dos agregados.....	76
Tabela 21 – Propriedades dos agregados utilizados nas misturas .....	77
Tabela 22 – Número de golpes segundo orientações da DNIT 164/13.....	80
Tabela 23 – Valor médio de Resistência à Compressão Simples .....	94
Tabela 24 – Valor médio de resistência a tração na flexão.....	97
Tabela 25 – Valor médio de resistência à tração por compressão diametral .....	100
Tabela 26 – Valor médio de módulo de resiliência.....	100
Tabela 27 – Valor médio de porosidade/teor de material cimentante .....	110
Tabela 28 – Relação entre MR e RTCD.....	115



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ARRA	Asphal Recycling and Reclaiming Association
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
C	Teor Volumétrico de cimento
$C_{\%}$	Percentual de cimento
$C_{al\%}$	Percentual de cal
$Ci_{\%}$	Teor volumétrico de material cimentante
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
cm	Centímetros
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CP	Corpo de Prova
CP I	Cimento Portland comum
CP II	Cimento composto
CP III	Cimento Portland de alto forno
CP IV	Cimento pozolânico
CP V	Cimento Portland de alta resistência inicial
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DER	<i>Departamento Estradas de Rodagem - São Paulo</i>
DMM	Densidade Máxima Medida
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
FP	Mistura 70% fresado 30% pó de pedra
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
g	Grama
GC	Grau de compactação
$g/cm^3$	Grama por centímetro cúbico
Hz	Hertz
IECA	<i>Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones</i>
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
$kg/m^3$	Kilograma por metro cúbico
km	Quilômetro
kN/s	Quilonewton por segundo
kPa/min	Quilopascal por minuto
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDTs	<i>Linear Variable Differential Transfor</i>
Macopav	Manual de Concepção de Pavimento da Espanha
mm	Milímetros
mm/s	Milímetros por segundo
mm/min	Milímetros por minuto
MR	Módulo de resiliência
MRF	Módulo de resiliência flexural
MPa	Mega Pascal
N	Newton
$\eta$	Porosidade

NBR	Norma Brasileira
$\eta/C_{i\%}$	Índice porosidade/teor volumétrico de material cimentante
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
RAP	Revestimento Asfáltico Reutilizavel
REF	Mistura Referência
RCS	Resistência à compressão simples
RT	Resistência à tração
RTCD	Resistência à compressão por tração diametral
RTF	Resistência à tração na flexão
RS	Rio Grande do Sul
SARA	<i>South African Roads Agency</i>
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UNIJUI	Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
°c	Temperatura em graus

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	23
1.1	OBJETIVO GERAL	24
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	25
2.1	MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS EM BASES DE PAVIMENTOS	25
2.1.1	<b>Brita graduada simples (BGS)</b>	25
2.1.2	<b>Brita graduada tratada com cimento (BGTC)</b>	28
2.1.3	<b>Aplicações do Cimento Portland em pavimentação</b>	32
2.1.4	<b>Aplicações da Cal em concretos e solos</b>	34
2.1.5	<b>Compactação e umidade ótima</b>	37
2.1.6	<b>Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos – MeDiNa</b>	38
2.2	BASE CONSTRUÍDA COM MATERIAL RECICLADO	40
2.2.1	<b>Comportamento mecânico de camadas cimentadas</b>	43
2.2.2	<b>Normatização nacionais</b>	47
2.2.3	<b>Normatizações e métodos internacionais</b>	48
2.2.3.1	<i>Dosagem pelo Método da Wirtgen</i>	48
2.2.3.2	<i>Método da Portland Cement Association (PCA)</i>	49
2.2.3.3	<i>Método da Austroads</i>	49
2.2.3.4	<i>Outros Método de dosagem</i>	50
2.2.3.5	<i>Comparativo entre os métodos</i>	51
2.3	PESQUISAS REALIZADAS COM MATERIAL FRESADO	53
2.3.1	<b>Pesquisas nacionais</b>	53
2.3.2	<b>Pesquisas realizadas no exterior</b>	60
2.4	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA, RIGIDEZ E DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE	62
2.4.1	<b>Resistência à compressão simples (RCS)</b>	62
2.4.2	<b>Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)</b>	62
2.4.3	<b>Módulo de resiliência (MR)</b>	63
2.4.4	<b>Resistência à tração na flexão (RTF)</b>	65
2.4.5	<b>Porosidade (<math>\eta</math>) e teores de material cimentante (<math>Ci\%</math>)</b>	66
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	69
3.1	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	69
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	71
3.2.1	<b>Origem e definição do material fresado asfáltico</b>	71
3.2.2	<b>Caracterização dos agregados</b>	76
3.2.3	<b>Materiais cimentícios</b>	77
3.3	METODOLOGIA PARA DOSAGEM E ENSAIOS REALIZADOS	78
3.3.1	<b>Misturas e Dosagem</b>	78
3.3.2	<b>Ensaio de compactação Proctor</b>	79
3.3.3	<b>Moldagem, cura e aceitação dos corpos de prova</b>	83
3.3.4	<b>Ensaio de Resistência à compressão simples (RCS)</b>	86
3.3.5	<b>Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)</b>	87
3.3.6	<b>Ensaio de Módulo de resiliência (MR)</b>	88
3.3.7	<b>Resistência à tração na flexão (RTF)</b>	89
3.3.8	<b>Porosidade e teores de material cimentante</b>	91
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E AVALIAÇÕES</b>	94

4.1	RELAÇÃO ENTRE O TEOR DE MATERIAL CIMENTANTE E RESISTÊNCIA.94	
4.2	POROSIDADE .....	104
4.3	POROSIDADE/TEOR DE MATERIAL CIMENTANTE .....	109
4.4	RELAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS E DURABILIDADE DA CAMADA CIMENTADA .....	114
4.5	COMPARAÇÕES ENTRE TEORES DIFERENTES DE CIMENTO E CAL .	116
4.6	AVALIAÇÃO DAS MISTURAS.....	122
4.7	COMPARATIVO ENTRE MISTURAS.....	123
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	127
5.1	ANÁLISE DO MATERIAL FRESADO X MATERIAL NATURAL .....	127
5.2	MATERIAIS CIMENTICIOS .....	128
5.3	POROSIDADE .....	128
5.4	POROSIDADE E MATERIAIS CIMENTICIOS .....	129
5.5	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS .....	130
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	131
	<b>APÊNDICE A - RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RCS: MISTURA FP</b> .....	142
	<b>APÊNDICE B - RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RCS: MISTURA REF</b> .....	144
	<b>APÊNDICE C - RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RTCD: MISTURA FP</b> .....	146
	<b>APÊNDICE D – RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RTCD E MR: MISTURA REF</b> .....	149
	<b>APÊNDICE E – RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RTF : MISTURA FP</b> .....	153
	<b>APÊNDICE F - RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RTF : MISTURA REF</b> .....	156

## 1. INTRODUÇÃO

Desde meados dos anos 80 técnicas de reaproveitamento de materiais ou a reciclagem propriamente dita de pavimentos são objetos de pesquisas por serem uma boa fonte de matéria-prima para construção e manutenção de rodovias. O uso destes recursos, está de acordo com a política internacional e com os órgãos de gestão nacional, pois faz uso de materiais descartados para a construção de novas obras. Diminuindo o impacto ambiental da retirada de material virgem, além de minimizar o gasto energético tanto na produção quanto no transporte desses materiais, o que reduz consideravelmente as emissões de dióxido de carbono (CO<sup>2</sup>) (TRICHÊS et al., 2013).

Desta forma o modal rodoviário brasileiro com cerca de 1.720.700,00 quilômetros de estradas de rodagem as quais interligam o Brasil e transportam cerca de 61% de todas as cargas movimentadas dentro do território nacional. Torna-se de suma importância para o desenvolvimento econômico e social do país, além de ser uma grande fonte de material prima, devido à continua manutenção e recuperação de seus trechos (Confederação Nacional de Transporte, CNT, 2018).

Baseando-se nisso pesquisas estão sendo desenvolvidas para o reaproveitamento do material fresado, contudo é necessário o aprofundamento do conhecimento das características desse material, tornando assim possível a aplicação do mesmo em substituição ao agregado natural. A utilização do material fresado ganhou foco nos últimos anos, devido à grande quantidade gerada a partir da manutenção de rodovias. Entretanto, para sua aplicação é necessário o conhecimento de suas propriedades, para assim haver parâmetros de dosagem para misturas elaboradas a partir de uma demanda de projeto.

Dessa forma, visando avaliar através de ensaios laboratoriais, misturas com *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) ou Pavimento Asfáltico Reciclado com adição de rocha basáltica pulverizada e material cimentante (cimento Portland CP IV e cal hidratada), correlacionado o índice porosidade/teor volumétrico de material cimentante ( $\eta/C_{i\%}$ ), com valores de resistência e de rigidez das misturas confeccionadas, a fim de se ter parâmetros de dosagem para misturas com material fresado, para aplicação em camadas de base ou sub-base de um pavimento.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar os parâmetros de resistência mecânica das misturas de material fresado estabilizado com pó de pedra e substituição parcial por cimento e cal.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desta forma para se atingir o objetivo principal, têm-se os seguintes objetivos específicos:

a) caracterizar o material utilizado (fresado, brita, pó de pedra e cal) através de ensaios laboratoriais de teor de betume, granulometria, Rice Test, Abrasão Los Angeles, equivalente de areia e massa específica;

b) confeccionar misturas de referência com material natural e com material fresado, ambas estabilizadas quimicamente com cimento CP-IV e adições de cal hidratada;

c) determinar as resistências à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e MR das diferentes misturas;

d) avaliar o efeito da porosidade em relação ao teor volumétrico de material cimentante, correlacionando as propriedades físicas e mecânicas das misturas elaboradas, através de ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, resistência à tração na flexão;

e) relacionar as propriedades encontradas das misturas, ao índice  $\eta/C_i\%$ ;

e,

f) avaliar as propriedades e aplicabilidades das misturas realizadas de cimento em percentuais de 4% e 5%, com adições de cal de 3% e 6%, para os tempos de cura de 7 e 91 dias, com grau de compactação de 1,8 – 1,9 e 2,00 g/cm<sup>3</sup>, correlacionando as misturas ao material de referência, procurando aplicabilidade das mesmas em obras de rodovias.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica onde os principais pontos do estudo estão sendo abordados, dando ênfase aos estudos já realizados que utilizaram o material fresado em substituição ao agregado natural, para o uso em obras rodoviárias.

As pesquisas e trabalhos avaliaram o emprego do material fresado estabilizado quimicamente e granulometricamente. Ainda são apresentados estudos do comportamento de misturas que utilizam adições de cimento e de cal para a estabilização química em solos e concretos, dando assim embasamento teórico à pesquisa realizada. Como parâmetro comparativo de referência, será utilizada uma mistura de brita graduada tratada com cimento e cal (BGTC).

### 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS EM BASES DE PAVIMENTOS

A pavimentação possui diversos materiais e métodos para a construção de camadas de base e sub-base. O mais corriqueiro é o uso de camadas granulares, com travamento interno, através de uma faixa granulométrica definida em norma, a qual posteriormente é compactada. Ainda, outra forma muito utilizada são as estabilizações químicas de camadas, com o emprego de cimento, cal e pozolanas. Construída com materiais britados, reciclados (fresado) com a finalidade de melhoria ao suporte de tráfego e durabilidade das camadas.

#### 2.1.1 Brita graduada simples (BGS)

A BGS atualmente é empregada em grande parte dos projetos de pavimentação flexível no Brasil. Seu uso em camadas de base e sub base deve-se a boa resistência ao se conseguir a formação do esqueleto mineral, intertravando os agregados a partir de uma granulometria definida em norma. Devido à abundância de reservas de rocha basáltica em diversas regiões do país, o seu uso apresenta custo relativamente baixo. O início de tal técnica no país se deu em meados dos anos 60, contudo, sua utilização tem registro há mais de dois mil anos, pelo Império Romano, o qual pavimentava em camadas suas vias. Tal método perdurou até meados de 1775, quando Tresaguet na França, acabou modificando-o, introduzindo uma camada drenante na superfície (HAAS *et al.*, 1994).

A definição de brita graduada simples (BGS) é tida como um material pétreo, oriundo da britagem de rocha sã e composto em usina, atendendo a uma

distribuição granulométrica bem graduada e que quando compactada adequadamente resulta em uma camada de pavimento com propriedades satisfatórias quanto à sua estabilidade e durabilidade (MOURA, 2013). A distribuição granulométrica possui diâmetro máximo de agregados não superior a 38,00 mm e finos entre 3 e 9% (passante na peneira 200), desta forma conferindo um bom intertravamento entre os agregados.

Em pavimentos flexíveis a BGS é utilizada como base granular, pois, quando devidamente compactada e confinada de maneira correta, gera uma grande resistência à esforços verticais e ainda propicia uma eficiente drenagem (HAAS *et al.*, 1994).

Na execução de uma camada BGS deve-se levar em consideração a origem do material empregado, além de atender as especificações de serviço dos órgãos competentes. O material deve ser avaliado segundo uma série de ensaios físico-químicos, como a forma dos agregados DNER-ME 086/1994, a equivalência de areia da fração fina DNER-ME 054/1997, o desgaste por meio do ensaio de abrasão Los Angeles DNER-ME 035/1998 e a durabilidade em solução de sulfato de sódio DNER-ME 089/1994. Para Silva (2018) o critério mais importante para emprego da BGS é a granulometria, tal importância se justifica devido ao intertravamento entre as partículas, sendo este encontrado através de faixas granulométricas. A Tabela 1 traz as características físicas e de resistência desejadas em norma para os materiais empregados em uma BGS.

Tabela 1 – Comparativo entre as especificações de execução de BGS

<b>Ensaio</b>	<b>DNIT 141/2010 - ES</b>	<b>DAER – Especificações Gerais</b>
Abrasão Los Angeles	≤ 55%	≤ 40%
Equivalente de Areia	≥ 30%	≥ 30%
CBR	≥ 80%	≥ 80%
Expansão	≤ 0,5%	≤ 0,5%
Sanidade	-	≤ 10%

Fonte: (Adaptado de Silva,2018)

O desenvolvimento das faixas granulométricas se deu através de estudos realizado por Fuller & Thompson (1907) e Talbot & Richard (1923) os quais através da Equação 1, desenvolveram elevadas densidades para concretos de cimento Portland. A busca estava relacionada a uma granulometria que se possibilita uma

elevada densidade, para ser usada em concretos. Para tanto estabeleceram critérios de proporção, relacionando a quantidade de material passante entre determinadas peneiras, como a razão entre o material passante na peneira #200 (0,074 mm) pelo passante na #40 (0,42 mm) ser inferior a 2/3. A Figura 1 demonstra o centro de faixas granulométricas de acordo com as especificações do DNIT 141/2010-ES e DAER – Especificações Gerais.

$$p = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (1)$$

Onde:

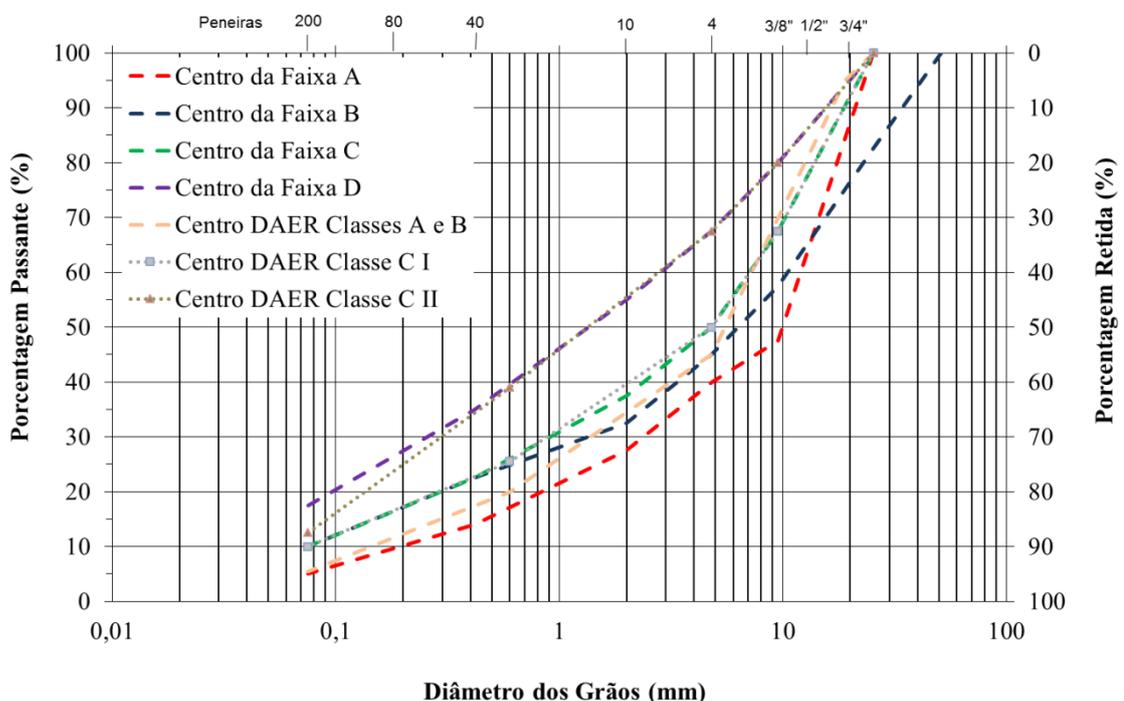
$p$  = é a porcentagem de fração com grãos de diâmetro menor que  $d$ ;

$d$  = é o diâmetro do grão (cm);

$D$  = é o diâmetro máximo dos grãos constituintes do material (cm);

$n$  = coeficiente que varia em função das peculiaridades do material (0,33 e 0,50).

Figura 1 – Faixas granulométricas de execução de BGS – DNIT141/2010-ES



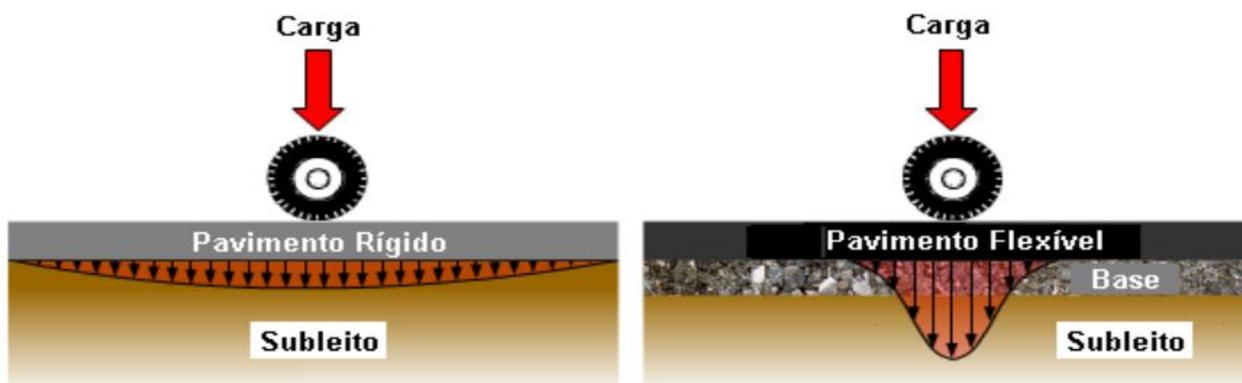
Fonte: (Autor).

Usualmente no território brasileiro é utilizado para o dimensionamento de estrutura de um pavimento, o ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*), ou Índice de

Suporte Califórnia, ISC (DNER-ME 049/1994). Tal ensaio mensura a qualidade do material empregado através de sua resistência. A BGS quando corretamente misturada e compactada apresenta um CBR = 100%, sendo um referencial para outros materiais.

Estudos realizados por Yoderet *et al.* (1975) demonstraram que a forma de transmissão da carga de rodas, variam segundo a estrutura do pavimento. Para pavimentos flexíveis as cargas são transmitidas ao subleito de forma concentrada e pontual com uma área muito reduzida. Já para pavimentos rígidos as cargas são distribuídas sobre uma área de atuação maior, não se concentrando apenas em um ponto de aplicação. A Figura 2 demonstra a concentração de cargas em pavimentos flexíveis e rígidos.

Figura 2 – Esforços em pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: (Autor).

### 2.1.2 Brita graduada tratada com cimento (BGTC)

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) tem grande emprego em pavimentos de vias de alto volume de tráfego. A BGTC pode ser definida como o produto resultante da mistura em usina, de pedra britada, cimento Portland, água e eventualmente aditivos, em proporções determinadas experimentalmente. Os Romanos foram os precursores da utilização de aglomerantes hidráulicos em vias onde havia a necessidade de uniformidade juntamente com durabilidade para utilização de deslocamentos de produtos e tropas. Um dos primeiros componentes

usados como aglutinante, para realizar a união entre os agregados foi a cal, juntamente com cinzas pozolânicas as quais eram usadas para estabilizar areais e argilas formando materiais granulares que serviam de base para as estradas. Contudo, apenas no século XX foram alcançados os maiores avanços na execução e estabilização de solos com aglomerantes para constituir camadas estruturais de pavimentos. A origem da BGTC, está ligada diretamente a estudos voltados a estabilização de solos com adições de materiais cimentantes (cimento Portland, cal e pozolana), os quais ocorreram em meados da década de 1910 a 1920, na Inglaterra, realizados por Brooke Bradley, no ano de 1917 (BOLIS; DI RENZO, 1949; BALBO, 2007 e BERNUCCI, 2008).

No Brasil o uso da BGTC começou a ser mais difundido no final da década de 1970. Em princípio, a BGTC pode ser enquadrada como uma brita graduada simples (BGS) com a adição de cimento na proporção de 3 a 5% em peso (ABNT NBR 12261/1991; DER-SP ET-DEP00/009/2005). Os pavimentos executados com bases estabilizadas com aglomerantes hidráulicos se caracterizam como pavimentos semirrígidos. Para Balbo (2007) a ação do ligante hidráulico na estabilização da camada de base gera um aumento de resistência frente as tensões de tração e compressão, contudo não apresenta características de rigidez semelhantes à do concreto Portland.

Bernucci *et al.* (2008) descreve que a resistência da BGTC está relacionada ao grau de compactação que para tal deve ser de no mínimo 95% da energia modificada. A água utilizada na composição da mistura exerce papel fundamental para facilitar a compactação, mas principalmente tem a função de hidratar o cimento que se mistura à fração granular fina, formando uma argamassa que se liga pontualmente aos agregados graúdos.

Em meados de 1944 no Reino Unido, surgem as primeiras especificações técnicas de estabilização de material pétreo com cimento Portland e a execução de bases de pavimentos em concreto magro compactado. Tal técnica foi difundida amplamente pela Europa, principalmente na Holanda e Bélgica na década de 1950 e no Leste Europeu na década de 1960. Assim, nesse período a técnica teve seu uso consagrado, apesar das diversas dificuldades encontradas em sua aplicação, que paulatinamente se tornaram objeto de estudos para a superação dos problemas ocorridos, (BALBO, 2006).

As primeiras obras Brasileira com uso da BGTC, foram realizadas na Rodovia dos Imigrantes (1974), Rodovia dos Bandeirantes (1978) e Rodovia dos Trabalhadores (1982) – hoje denominada Rodovia Ayrton Senna (BALBO, 1993).

Para tanto o dimensionamento desta nova técnica seguia métodos semi-empíricos, sendo que a análise de fadiga para este material não era realizada. Tais métodos de análise de fadiga só foram desenvolvidos em 1980, por Pinto e Preussler com experiência na pista de Imbituba-SC (SUZUKI, 1992). Em 1993, Balbo desenvolveu modelos empíricos-teóricos.

O pavimento semirrígido também conhecido como pavimento do tipo direto, é caracterizado com a execução da camada de revestimento asfáltico sobre camada de base cimentada e do tipo indireto ou invertido quando a camada de revestimento é executada sobre camada de base granular e sub-base cimentada. Tal técnica é utilizada na pavimentação para evitar a reflexão de trincas de retração e de fadiga da camada cimentada (BGTC) para o revestimento asfáltico. Para tanto a estrutura do pavimento é executada de tal forma que o MR das camadas vai decrescendo com o aumento da profundidade.

A inversão de camadas ocorre com a modificação do uso dos materiais, convencionalmente, os materiais mais resistentes ficam posicionados em camadas superiores. Ou seja, em um pavimento invertido a BGS (que apresenta menor MR do que a BGTC), é usada como camada de base ao passo que a BGTC é disposta na camada de sub-base. O fato acaba alterando o MR da BGS, passando da faixa de 100 a 400 MPa para 300 a 700 MPa. Isso ocorre como consequência da rigidez da sub-base ser superior à da base, acarretando uma maior tensão confinante sobre a BGS que apresenta deformabilidade muito sensível ao confinamento (SUZUKI, 1992).

Para Balbo (2006) a larga utilização da BGTC em projetos de pavimentos de rodovias de grande tráfego, é antiquada e inconsistente, em consequência da heterogeneidade na sua matriz cimentícia, responsável pela geração de poros e descontinuidades em sua estrutura interna. Conseqüentemente a BGTC oferece baixíssima resistência à fratura, tornando-se muito vulnerável ao fenômeno de fadiga.

A execução de camadas com a utilização da BGTC, possui critérios em relação aos materiais utilizados, agregado, cimento Portland e água. Pode-se utilizar as características da aceitabilidade no quesito agregados, dos ensaios físico-

químicos utilizados na execução da BGS. Já para utilização do cimento Portland, e de acordo com o DNER-ME em sua normativa 036/1994, existem critérios que devem ser observados levando em consideração ao tipo de cimento usado na execução da BGTC. Desta forma deve-se atentar para as especificações das seguintes normas: ABNT NBR 5732 quando utilizado cimento Portland comum (CP I), ABNT NBR 11578 para o emprego de cimento composto (CP II), ABNT NBR 5735 quando empregado cimento Portland de alto forno (CP III), ABNT 5736 para utilização de cimento pozolânico (CP IV) e ABNT NBR 5733 quando empregado cimento Portland de alta resistência inicial (CP V). Ainda a água utilizada para hidratação do cimento, na execução da BGTC deve ser considerada potável e estar isenta de matéria orgânica ou outras substâncias prejudiciais à hidratação do cimento.

A Tabela 2 demonstra as principais especificações para o emprego de materiais na execução da BGTC, ainda a Tabela 3 traz as referências de peneiras e seus respectivos percentuais passantes, para a execução de uma BGTC segundo a ABNT NBR 11803/2013.

Tabela 2 – Especificações de execução de BGTC

<b>Ensaio</b>	<b>ABNT NBR 11803/2013</b>
Abrasão Los Angeles	< 40%
Equivalência de Areia	> 35%
Índice de forma	≤ 2
Durabilidade: Sulfato de Sódio	< 20%
Sulfato de Magnésio	< 30%

Fonte: (Adaptado da NBR 11803, 2013).

Tabela 3 – Faixas granulométricas para execução de BGTC

<b>Peneira de malha quadrada</b>		<b>Passante (%)</b>	
		<b>ABNT</b>	
ASTM	mm	A	B
2"	50	100	-
1 1/2"	37,5	90-100	-
1"	25	-	100
3/4"	19	50-85	90-100
3/8"	9,5	34-60	80-100
Nº 4	4,8	25-45	35-55
Nº 40	0,42	8-22	8-25
Nº 200	0,075	2-9	2-9

Fonte: (Adaptado da NBR 11803, 2013).

### 2.1.3 Aplicações do Cimento Portland em pavimentação

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico que produz reações exotérmica de cristalização de produtos hidratados, quando na presença de água. Composto basicamente por argila e calcário, a união destes dois elementos sob altas temperaturas gera o clínquer, que é a matéria prima básica do cimento. A formação do cimento ocorre quando o clínquer é moído e junto a ele é adicionado gesso, com a intenção de auxiliar o retardamento do início da pega. O nome dado a cada tipo usual de cimento é devido a adição do terceiro componente que tem a função de melhorar as propriedades do material, podendo ser escória, pozolana ou fíler. A Tabela 4 traz as características de aplicação e materiais constituintes, além das normatizações do cimento Portland.

Tabela 4 – Características e Normatizações do cimento Portland

Tipos de Cimento Portland	Características	Normatização (NBR)
CP I	Sem aditivo	5.732
CP II	CP-II E – cimento Portland com adição de escória de alto-forno	11.578
	CP-II Z – cimento Portland com adição de material pozolânico	
	CP-II F – cimento Portland com adição de material carbonático	
CPIII	Possui de 35% a 70% de escória de alto-forno. Maior impermeabilidade e durabilidade Baixo calor de hidratação. Alta resistência à expansão e sulfatos.	5.735
CPIV	Possui em sua composição de 15% a 50% de material pozolânico. Estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido (sulfatos) Baixo calor de hidratação Resistente à ação da água do mar e de esgotos	5.736
CPV	Possui alta reatividade nas primeiras horas de aplicação, atingindo altas resistências curto intervalo de tempo, muito utilizado em obras industriais que exigem um tempo de desforma menor	5.733

BRANCO	Principal característica a cor branca devido a teor baixo de manganês e ferro e utilização do caulim no lugar da argila. Existem dois tipos de cimento branco	12.989
BAIXO CALOR DE HIDRATAÇÃO	Possui propriedade de retardar o desprendimento de calor em peças de grande massa de concreto, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica, devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento.	13.116
RS - RESISTENTE A SULFATOS	Indicado para construções onde existe a presença de sulfatos.	5.737

Fonte: (Adaptado da ABCP, 2020).

Na pavimentação o emprego de cimento Portland ocorre para melhoria das propriedades de solo moles e para estabilização quimicamente de bases granulares, com uso de material virgem ou de material de descarte (fresado). Diversos autores como Oliveira (2003), Paiva e Oliveira (2010), Aranha (2013) e Lopéz (2016), realizaram experimentos com tal aglomerante para a estabilização química de misturas com material virgem e fresado, buscando a aplicação destas misturas em camadas de pavimento. A Tabela 5 traz alguns autores que realizaram experimentos com cimento Portland na área de pavimentação, os quais empregaram o material fresado em substituição ao material virgem. Já a Tabela 6 traz as características de cura e resistência de cimento Portland.

Tabela 5 – Pesquisa com o uso do cimento Portland em pavimentação

Autor	Ano	Tipo de Cimento	Percentual usado	Aplicação
Oliveira	2003	CP II - E	3, 4 e 5	Fresado + Material Virgem
Dellabianca	2004	CP II - F	2	Fresado + Material Virgem
Gusmão	2008	CP V	3 e 5	Fresado + Material Virgem
Paiva e Oliveira	2010	CP II - E	3	Fresado + Material Virgem
Trichês e Santos	2011 e 2013	CP V	3	Fresado + Material Virgem
Aranha	2013	CP II	5	Solo + Fresado
Ely	2014	CP II - E	4	Fresado + Material Virgem
Kleinert	2010	CP II	1 a 7	Fresado + Material Virgem

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Características de resistência e cura do cimento Portland

Tipo Cimento	Classe	Tempo de Pega		RCS PARA CURA (MPa)			
		Início (h)	Fim (h)	3 dia	7 dia	28 dias	91 dia
CPI	25-32-40	>1	<10 <sup>1</sup>	>8, >10 e >15	>15 >20 e >25	>25, >32 e >40	-

CPII-E								
CPII-Z	25-32-40	>1	<10 <sup>1</sup>	>8, >10 e >15	>15 >20 e >25	>25, >32 e >40	-	
CPII-F								
CPIII	25-32-40	>1	<12 <sup>1</sup>	>8, >10 e >12	>15 >20 e >23	>25, >32 e >40	>32, >40 e >48	
CPIV	25-32	>1	<12 <sup>1</sup>	>8 e >10	>15 e >20	>25 e >32	>32 e >40	
CPV-ARI	-	>1	<10 <sup>1</sup>	>24	>34	-	-	

Fonte: (Adaptado da ABCP, 2020).

### 2.1.4 Aplicações da Cal em concretos e solos

Johann (2013) descreve que a cal pode ser considerada o estabilizador químico mais antigo utilizado entre os materiais existentes, com elevada relevância histórica já que é constituinte de obras que ao longo do tempo conseguiram se manter com as suas propriedades originais quase que inalteradas. Entre outras obras com elevada relevância pode-se citar a Via Ápia, erguida pelos Romanos, que possui cerca de 30 quilômetros, a qual mantém até os dias de hoje suas características básicas, devido às propriedades cimentantes da cal.

De acordo com Guimarães (2002) a cal é o produto da calcinação em temperaturas próximas de 1000°C de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas existentes na superfície terrestre. Em sua forma hidratada deve obedecer às determinações constantes na NBR 7175/2003. A Tabela 7 traz as propriedades desejadas em valores médios das cales.

A cal hidratada além de ser um aglomerante aéreo, apresenta elevada alcalinidade, com alto teor de óxido de cálcio, o qual possibilita a sua utilização em concretos com grandes teores de substituição de cimento por adições minerais, tendo como finalidade prover o hidróxido de cálcio das reações pozolânicas e ainda restabelecer a reserva alcalina do concreto, que sofre decréscimo variável dependendo da reatividade e teor de cada adição.

Tabela 7 – Composição média das cales brasileiras

Tipo de Cal	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO +MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)
Cal Virgem Cálcica	90–98	0,1–0,8	0,5–3,5	0,2–1,0	0,5–5,0	0,2–	0,1–0,6	96–98,5	–

						3,8			
Cal Hidratada Cálcica	70–74	0,1–1,4	0,5–2,5	0,2–0,8	23–27	1,5–3,5	0,1–0,0		0,5–1,8
Cal Hidratada Dolomítica ou Magnésiana	39–61	15–30	0,5–18,2	0,2–1,5	19–27	3,0–6,0	0,02–0,2	76–99	5 – 25
Cal Virgem Dolomítica Ou Magnésiana	51–61	30–37	0,5–4,5	0,2–1,0	0,5–4,8	0,5–4,5	0,05–0,1		–

Fonte: (Adaptado de Guimarães, 2002).

Hoppe (2002) descreve que a cal hidratada ao reter a água, dificulta a hidratação do cimento. Tal impedimento possibilita a formação de uma microestrutura mais compacta, com partículas anidras de cimento, que com a liberação progressiva da água retida pela cal ao longo do tempo, propiciará uma cura interna do concreto, hidratando as partículas anidras, e conseqüentemente, densificando o gel, sem que haja retração excessiva do concreto.

Ainda de acordo com Hoppe (2002) a adição da cal em concretos atua no refinamento do tamanho das partículas de hidróxido de cálcio, os quais são oriundos da hidratação do cimento e da cal hidratada, através da sílica amorfa proveniente das pozolanas e/ou escória, reforçando a estrutura cristalina do C-S-H, mantendo a reserva alcalina e atuando como preenchimento dos poros, através do efeito filler, o que atribui vantagens físicas sobre o concreto, tornando-se visível através da diminuição dos coeficientes de permeabilidade e absorção capilar e incrementos na resistência à compressão.

Em um contexto geral a cal em adições para concretos não possui resultados satisfatórios em tempos iniciais, aos 7 e 14 dias de cura, mas, quando se possibilita a hidratação do cimento com tempos de cura superiores a 28 dias se encontra acréscimos de resistência consideráveis na aplicação da cal em misturas para concretos. Para Mira *et al.* (2002) a qual realizou estudos de adições em massa, entre 0% e 25% de cal hidratada com teor de óxido de cálcio (CaO) igual ou superior a 98%, fator água/aglomerante de 0,61, para concretos com mínimo de 320 kg/m<sup>3</sup> de cimento, sendo empregado o cimento Portland pozolânico, com teor de 80% de cimento e 20% de cinza volante, para tempos de cura superiores a 90 dias, obteve resultados positivos com o incremento de resistência devido a adição da cal hidratada, sendo os maiores valores de RCS (Resistência a Compressão Simples),

obtidos no traço que continha um teor de 25% de cal hidratada, e ainda mantendo-se como melhor traço até os 360 dias de cura.

Hoppe (2008) descreve que a utilização da cal hidratada cálcica, em concretos, ocorre devido a atividade física e química da mesma na hidratação do cimento, devido a influência do hidróxido de cálcio de sua matriz. Tal material possui área específica BET de cerca de 10 vezes o tamanho do cimento, composta basicamente por hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e uma fração residual insolúvel. Sendo assim o hidróxido de cálcio constitui a fração aglomerante da cal hidratada enquanto que o carbonato e o resíduo insolúvel representam a fração inerte.

Desta forma em sua composição, a cal hidratada sempre terá uma fração de material inerte, o qual atua fisicamente na hidratação do cimento. Ainda devido a elevada finura e área específica, as partículas aumentam a eficiência como agente nucleador para a precipitação dos hidratos do cimento.

Para Hoppe (2008) as reações químico-física, ocorridas na reação de hidratação do cimento pozolânico com a presença da cal hidratada cálcica, iniciam de imediato com a liberação de íons cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), aluminato ( $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) para a solução. Devido a alcalinidade liberada pelo cimento e pela concentração de outros íons, a solubilidade do hidróxido de cálcio é diminuída, mas ela contribui para a saturação do meio. Com a mudança de concentração dos íons de cálcio na solução, proveniente da existência da cal, ocorre a alteração da cinética de hidratação do cimento. Desta forma a altíssima presença de íons de cálcio na solução ocorre em menos tempo, devido a este evento é antecipado o período de aceleração das reações, assim a cal hidratada é um acelerador da cinética de hidratação do cimento Portland.

Assim a cal hidratada influencia na reação da cinza volante a qual reflete na relação hidróxido de cálcio/pozolana ao longo do tempo. Sendo considerado como praticamente nulo em seu estágio inicial (primeiras horas ou período de indução) para o sistema cimentício pozolânico. Com o crescimento das reações de hidratação do cimento, aumenta proporcionalmente a relação do hidróxido de cálcio/cinza volante até um valor máximo, onde o consumo da cal por atividade pozolânica passa a ser maior que a liberada pela hidratação do cimento, diminuindo paulatinamente a disponibilidade de portlandita e, em consequência, a relação cal/pozolana (HOPPE, 2008). Desta forma o início da atividade pozolânica depende da solubilização da

fração vítrea da cinza volante e da presença de portlandita. Devido a este fato a reação inicial da cinza volante em cimento pozolânico é dependente de uma disponibilidade mínima de hidróxido de cálcio.

Com o incremento da cal hidratada ao cimento pozolânico ocorre a disponibilidade do hidróxido de cálcio para interação com a cinza volante. Sendo o hidróxido de cálcio, oriundo da cal hidratada, juntamente com a portlandita liberada pela hidratação do cimento, resulta em maior concentração de cal na pasta hidratada e, em consequência, um maior grau de reação da cinza volante durante a evolução da hidratação pode ser esperado (HOPPE, 2008). A solubilização da fase vítrea, dependente da dissolução dos álcalis do cimento, não é alterada pela presença da cal, desde que mantida a relação água/cimento, porém, a maior concentração de portlandita antecipa o início da atividade pozolânica. Desta forma a cal participa ativamente das reações de hidratação do cimento e possibilita os ganhos de resistência a tempos de cura mais longos.

### **2.1.5 Compactação e umidade ótima**

A compactação e a umidade ótima empregadas na construção de camadas de pavimento possuem papel fundamental para a aquisição de resistência e durabilidade. Tanto no emprego de materiais virgem como na utilização de material reciclado. Paiva e Oliveira (2014) relatam que além de outros fatores, a compactação e umidade ótima adotados, influenciam no desempenho final da mistura, e que para bases cimentadas o ganho de resistência não está ligado só na quantidade de material cimentante, mas, pelo grau de compactação adotado e pela correta hidratação do material.

De acordo com DNIT (2006) a compactação pelo método de Proctor ocorre através da aplicação de uma energia mecânica (pressão, impacto ou vibração) em um solo ou outro material, como misturas betuminosas. O resultado desta aplicação de energia, é o aumento de sua massa específica aparente, e redução de vazios do material, conseqüentemente gerando um aumento na resistência ao cisalhamento e redução da permeabilidade e compressibilidade. O protocolo de Proctor estabelece três energias a partir da queda de um peso padrão, sendo elas, a energia Normal (12 golpes), Intermediária (26 golpes) e Modificada (55 golpes).

Para o PCA (2007) e Wirtgen (2012), a procura de maiores resistências a partir de um mesmo teor de cimento ou material cimentante, está diretamente ligada ao grau de compactação submetido a tal mistura. Contudo para a correta compactação é necessário que o material possua a umidade ideal ou ótima, que possibilite o aumento da massa específica aparente. A umidade do material é determinada pela NBR 6457 (1986) através da secagem em estufa a 110°C de uma amostra retirada do corpo-de-prova, compactado.

Outro fator relevante ocorre quando da presença de grande quantidade de água, a qual leva à separação das partículas da mistura, já se a lubrificação for insuficiente não permitirá a geração de uma formação mais densa. Contudo, o incremento de água controlado, é necessário para a correta compactação. A Tabela 8 traz algumas pesquisas realizadas com material granular e respectivos graus de compactação e umidade adotados.

Tabela 8 – Umidade ótima e energias de compactação usadas

Pesquisador	Umidade utilizada em percentual	Energia utilizada (Proctor)	Material utilizado
Oliveira (2003)	7%	Normal	Fresado + Agregado
Gusmão (2008)	variando 4% a 8%	Intermediária	Fresado + Agregado
Paiva e Oliveira (2010)	5,6%, 6,6% e 7,6%	Intermediária e Modificada	Fresado + Agregado
Pasche (2016)	8%	Normal, Intermediária e Modificada	Fresado + Agregado
Silva (2018)	8%	Normal, Intermediária e Modificada	Fresado + Agregado

Fonte: Autor

### 2.1.6 Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos – MeDiNa

O método atual de dimensionamento para pavimentos asfálticos é baseado em métodos empíricos, oriundos de experimentos e observações na década de 60. O qual só poderia ser aplicado adequadamente nos locais com condições climáticas semelhantes ao ambiente onde o método foi desenvolvido (JÚNIOR J., JÚNIOR C., FONTENELE H., 2016).

Para elaboração de uma solução desse problema se iniciou o desenvolvimento de um método a partir de conceitos Mecanísticos-Empíricos (ME), além de modelos teóricos do comportamento estrutural do pavimento os quais fornecessem informações para dimensionamento e suporte as solicitações

existentes do tráfego atual. Tal método avalia a relação tensão-deformação que ocorre nas estruturas do pavimento causadas pelas cargas do tráfego, a partir de uma estrutura pré-dimensionada. As respostas estruturais são determinadas com o auxílio de recursos computacionais.

Com a adição das informações dos materiais, são calculados os danos acumulados na vida de serviço da via. Isso oportuniza a comparação do desempenho do pavimento frente aos critérios necessários para o bom uso da rodovia. Quando do não atendimento dos critérios de desempenho, varia-se os parâmetros do pavimento, como espessuras, materiais e suas propriedades (Poisson, Módulo de resiliência), até que se satisfaça uma estrutura ideal em termos econômicos, funcionais e de vida útil (SILVA G., 2018).

A construção de conhecimento sobre as análises mecânicas de tensões e deflexões, a caracterização física e mecânica detalhada dos materiais, o desenvolvimento de ensaios não destrutivos dos pavimentos, a utilização de ensaios com tráfegos acelerados e o acúmulo de experiências durante décadas nas práticas de construção de rodovias são os principais fatores que viabilizam o desenvolvimento da metodologia ME (SILVA G., 2018).

O surgimento do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos - MeDiNa, ocorreu a partir de pesquisa desenvolvida entre os anos de 2015 - 2018 pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, com a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES e de diversas Universidades do país. Tendo tal trabalho o nome: *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecânico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos* (IPR, 2018).

O conceito central do método de dimensionamento ME é o entendimento de que o pavimento, como qualquer outra estrutura de engenharia pode ter seu comportamento avaliado de forma analítica e a luz da teoria da mecânica das estruturas. Por consequência, solicitações, resistência dos materiais e todos os seus fatores intervenientes precisam ser equacionados.

Para a avaliação da resistência da estrutura global do pavimento é requerida uma prévia caracterização das capacidades dos seus materiais constituintes. Motta (1991) descreve que tais características são avaliadas por meio de ensaios que reproduzam o estado de tensões e as condições ambientais a que os pavimentos

estarão sujeitos em campo. Desta forma para um dimensionamento analítico da camada asfáltica, é indispensável conhecer seu comportamento mecânico, especialmente quanto à sua deformabilidade elástica, ou seja, conhecer o módulo de elasticidade e o seu coeficiente de Poisson. Para Franco (2007) numa avaliação Mecanísticos-Empíricos, o Módulo de Resiliência e Coeficiente de Poisson constituem os principais parâmetros necessários à caracterização da capacidade dos materiais (asfálticos ou granulares) do pavimento.

Assim o software MeDiNa, traz opções de dimensionamento a partir de conhecimentos teóricos e práticos, dos materiais as serem utilizados nas camadas do pavimento, podendo ser verificadas espessuras e diferentes materiais de acordo com a região onde será realizada a obra, dando melhores meios de utilização de materiais regionais diminuindo custos e simulando melhor a vida útil da via. Contudo para isso experimentos com materiais regionais como solos, rochas e materiais reciclados são necessários para a análise do software, pois as propriedades dos mesmos quanto a sua resistência e rigidez são informações essenciais para o dimensionamento do pavimento.

## 2.2 BASE CONSTRUÍDA COM MATERIAL RECICLADO

Na década de 80 se iniciou um novo pensamento sobre a reciclagem de materiais, surgindo a mentalidade do reaproveitamento de resíduos originados de descarte, usando-os para diminuir os impactos ambientais da extração de materiais virgens, juntamente com a economia energética na construção de novas obras. Desta forma, o reaproveitamento de materiais oriundos de manutenção de pavimentos se tornou alvo de pesquisas, por se tratar de uma técnica economicamente viável e também politicamente correta, pois, a matéria prima principal seriam materiais descartados ou fora dos padrões de uso. Além disso, o gasto energético é minimizado tanto com relação à produção como para o transporte dos materiais. Assim, ocorre economia financeira e a diminuição da emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), também reduz consideravelmente o tempo de interrupção do tráfego de vias (TRICHÉS et al. (2013); FHWA (1997)).

De acordo com a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2001) e *Portland Cement Association* (PCA, 2010) a fresagem inicialmente é feita na camada de revestimento, podendo muitas vezes atingir camadas de base e até

mesmo a sub-base. Contudo a técnica de reaproveitamento do material oriundo de fresagem de pavimentos não é uma técnica relativamente nova, porém, não possui metodologias de aplicação ou dosagem como as existentes para concretos, ou ainda uma normatização para o seu uso. No Brasil, o DNIT (2006) em uma de suas normativas técnicas orienta a utilização do material fresado em rodovias de baixo tráfego, acostamentos defeituosos e na utilização como material para bases estabilizadas.

A utilização do material fresado em reabilitações de pavimentos está associada a fatores técnicos, ambientais e econômicos (KLEINERT, 2016). Para Wirtgen (2012) um dos principais fatores do reaproveitamento de material fresado, se deve aos custos com a produção ou extração de material virgem e o transporte do mesmo. Ainda sua utilização não necessita de criação de novas jazidas, e nem a criação de bota-fora, assim ajudando na preservação ambiental.

De acordo com o *Instituto Español Del Cementoysus Aplicaciones* (IECA, 2013), a restauração de um pavimento degradado através da reciclagem, cria uma nova camada com características mecânicas superiores devido principalmente a homogeneidade, com capacidade de suporte melhorado, reduzindo tensões sobre o topo do subleito e no revestimento asfáltico. Ainda a diminuição do tempo de interrupção proporciona menores transtornos aos usuários, além de diminuição de custo e redução do risco de exposição das camadas inferiores do pavimento ao efeito das condições climáticas e de tráfego durante a construção (ELLIS (2002); WIRTGEN (2012))

Contudo para a utilização de tal técnica deve-se atentar as suas limitações ou desvantagem sendo necessário um estudo prévio para cada situação. De acordo com Wirtgen (2012) o incremento de rigidez devido ao agente cimentante adicionado em misturas com material fresado, possibilita o surgimento acelerado de trincas por fadiga, o que provoca a redução do desempenho estrutural do pavimento.

Outro fator é a variação das características dos materiais existentes no local devido a exposição e da ação de intempéries, trânsito de veículos entre outros, desta forma se faz necessário a caracterização dos materiais existente com suas características atuais, assim existe a necessidade de ensaios laboratoriais de caracterização, a serem realizados em loco (JASIENSKI e RENS (2002)).

A granulometria tem papel fundamental na estabilização de bases granulares, assim como de bases recicladas. A utilização de material reciclado deve prever o

intertravamento das partículas assim como de uma base convencional. O material fresado possui deficiência em finos, a qual é sanada com o incremento de material virgem.

Os órgãos regulamentadores, Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte (DNIT) e Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER), fazem o emprego de faixas granulométricas para controlar a estabilidade das misturas as quais são dependentes da metodologia empregada. Para o material fresado, Wirtgen (2012) indica que os fatores que influenciam a granulometria são determinados pela condição do asfalto *in situ* e pela operação de fresagem: composição e uniformidade do material asfáltico existente, temperatura, profundidade de fresagem, velocidade de avanço da fresadora e sentido de corte.

Ainda a resistência da camada cimentada está ligada ao teor de cimento utilizado e diretamente ao grau de compactação submetido a camada (DAER (2005); DNIT (2013); PCA (2007); Wirtgen (2012)).

Para a PCA (2010) os procedimentos de compactação usualmente utilizados em mistura de base, usam a mesma energia de compactação preconizada pelo protocolo de Proctor, desta forma determinando a umidade ótima, que possui o maior grau de compactação.

Sendo assim, se a mistura possuir teores elevados de água, o excesso da mesma levará à separação das partículas da mistura, já se a lubrificação for insuficiente não permitirá a geração de uma formação mais densa. Contudo, o incremento de água assim como de material cimentante empregados na compactação é em função das características granulométricas das misturas assim como das resistências de projeto (PCA, 2010).

Para López (2016) em misturas com materiais finos, existe a necessidade de incremento de cimento e água devido a maior superfície específica das partículas finas. Ainda aspectos executivos como a densificação, causada pelo aumento da energia de compactação também influenciam nas propriedades mecânicas da mistura. A PCA (2007) indica que durante muitos anos foi empregada a energia Proctor Normal, mesmo que os graus de compactação em campo eram usualmente 100% ou maiores para este tipo de energia.

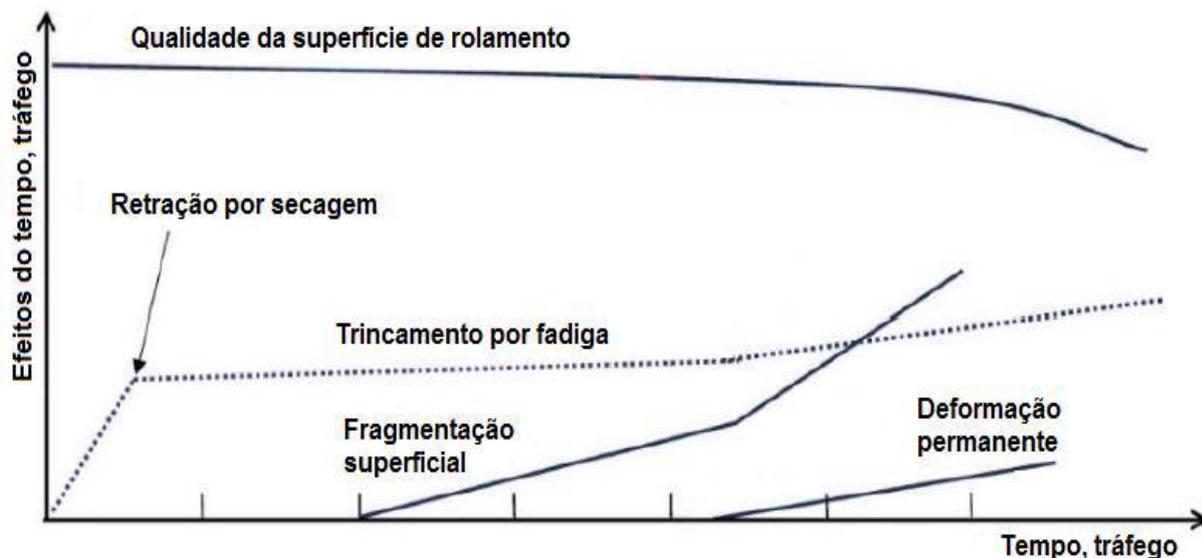
Fedrigo (2015) descreve que a energia de compactação tem grande influência na estabilidade, assim como a adição de cimento Portland tem na estabilização química, ocorrendo incremento de resistência devido ao aumento dos contatos na

matriz da mistura pela redução da porosidade. Neste sentido, a norma mais recente de reciclagem no Brasil tem preconizado a utilização de 98 % da energia Modificada (DNIT, 2013a).

### **2.2.1 Comportamento mecânico de camadas cimentadas**

López (2016) descreve que a técnica de reciclagem profunda de pavimentos a frio considera a utilização de diferentes tipos de agentes estabilizadores, como cimento Portland, cal e pozolanas, dependendo das características as quais se deseja atingir. Ainda para Wirtgen (2012) a função do agente cimentante é provocar o incremento de resistência a tração e compressão, os quais tornaram a base reciclada menos dependente do estado de tensões. Já para Aranha (2013) quando uma camada se comporta como rígida, as mudanças estruturais e funcionais ao longo prazo de um pavimento flexível com inclusão de uma base reciclada são determinadas por processos de fragmentação superficial, reflexão de trincas que estão associadas à retração por secagem e ao trincamento por fadiga, a Figura 4 traz através de um gráfico tais acontecimentos ao longo do tempo.

Figura 3 – Mudanças estruturais de pavimentos flexíveis com base cimentada.

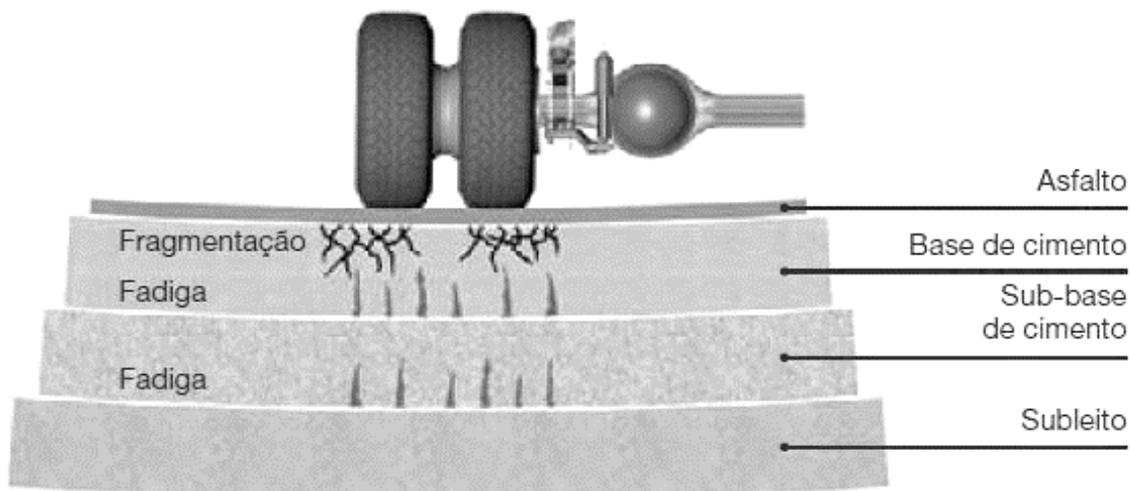


Fonte: (Adaptado de López, 2016).

Ainda para López (2016) a fragmentação superficial ocorre na parte superior da camada estabilizada, quando ultrapassada a resistência à compressão do material. Para Wirtgen (2012) a geração deste tipo de fratura está ligada a resistência da camada a compressão, da espessura e da pressão dos pneus.

A Figura 4 demonstra os mecanismos iniciais de falhas, como descritos por Wirtgen (2012), quando no estágio inicial ocorre a reflexão de trincas, causado pelo fenômeno de retração inerente à estabilização com agente cimentante. O processo de fadiga ocorre a longo prazo, devido as cargas repetidas do tráfego, o qual é determinante quanto às mudanças estruturais e funcionais da camada. Ainda em determinado estágio quando o dano for severo, a camada pode se comportar como um material granular, uma extensão do dano por fadiga. Já a deformação permanente pode acontecer em qualquer estágio, sendo causada pela combinação dos outros mecanismos de fratura.

Figura 4 – Mecanismos de falhas de camadas cimentada



Fonte: (Adaptado de Wirtgen, 2012).

Contudo, quando ocorre a adição de materiais cimentantes diversos, como a cal e pozolanas tal idade deve ser revista devido a necessidade de maiores períodos de cura. Para Johann (2007) e Hoppe (2008), quando se utiliza a cal e adições de pozolana, o tempo de cura para um ganho de resistência, devido a presença de tais materiais, deve ser superiores a 28 dias. A Tabela 9, demonstra valores típicos de resistência a compressão simples aos 7 dias de cura, segundo normas e pesquisas que usam a reciclagem de camadas de pavimento como agregado. Ainda a Tabela 10 traz a granulometria adotada segundo a DNIT167/2013-ES, para misturas de cimento Portland e agregados oriundos de camadas de pavimento.

Tabela 9 – RCS aos 7 dias de cura para material reciclado.

Autor	Resistência à compressão simples (MPa)	
	Min	Máx.
PCA (2005,2007,2010)	1,0 (2,1, típico)	4,1 (2,8, típico)
DER (2005)	3,5	8
DNIT (2013a)	2,1	2,5
JRA (1987)	2,5	3

Fonte: (Adaptado de López, 2016)

Tabela 10 – Faixas granulométricas de misturas com material reciclado.

Peneira de malha quadrada		Passante (%)	
		ABNT	
ASTM	mm	I	II
2"	50,8	100	100
1"	25,4	75-90	100

3/8"	9,50	40-75	50-85
Nº 4	4,75	30-60	35-65
Nº 10	2,0	20-45	25-50
Nº 40	0,425	15-30	15-30
Nº 200	0,075	5-15	5-15

Fonte: (Adaptado do DNIT 167-ES, 2013).

Austroroads (2002) e López (2016) definiram níveis de cimentação para algumas misturas, levando em consideração à compressão da mistura, e ampliando-a em função do comportamento resiliente, os quais são demonstrados na Tabela 11. Ainda Vorobieffe e Wilmot (2001) descrevem que a falta de conhecimentos provoca o uso de relações conservadoras, entretanto, informam que as maiores dificuldades são a sua representatividade e a adoção de um Módulo de Resiliência, especialmente para camadas espessas.

Tabela 11 – RCS e MR para camadas cimentadas aos 28 dias de cura

<b>Nível de cimentação do material</b>	<b>Teor de cimento (%)</b>	<b>RCS (MPa)</b>	<b>Módulo de flexural (MPa)</b>
Modificado	0,75 – 1,0	< 1,0	≤1000
Levemente cimentado	2,0– 3,0	1,0 – 4,0	1500 – 3000
Fortemente cimentado	4,5 – 5,5	> 4,0	≥ 5000

Fonte: (Adaptado de Austroroads, 2002).

Os valores mínimos e máximos de RCS normatizados servem de parâmetros de controle, para o valor mínimo, deve-se assegurar o suporte ao tráfego projetado, reduzir o risco de ruptura por fragmentação superficial, já para o valor máximo, deve ocorrer restrição da reflexão de trincas por retração e fadiga, desta forma minimizando à presença de água, responsável por mudanças volumétricas. Todavia, o motivo principal da limitação da resistência é evitar que a mistura se torne quebradiça, além de reduzir o fenômeno de reflexão de trincas (PCA, 2005).

Para a resistência a flexão, a inclusão de uma base reciclada leva a um incremento de rigidez do pavimento apresentando o comportamento de um pavimento semirrígido. Desta forma uma base cimentada, trabalha sob compressão no topo enquanto nas fibras inferiores estão sujeitas a flexão. Segundo Silva (2018), no Brasil a resistência a tração é avaliada com o ensaio de RTCD. Para Wirtgen (2012) o valor mínimo de 0,25 MPa no ensaio de RTCD, é necessário para impedir que a mistura se desintegre devido as mudanças volumétricas que ocorrem no

decorrer do processo. Tal valor vem em acordo com o DNIT-ES 167/13, que descreve valores entre 0,25 e 0,35 MPa.

O ganho de resistência está interligado ainda a cura realizada na mistura, causado pela adição de materiais cimentantes como o cimento Portland, cal e pozolanas. De acordo com a PCA (2007) a qual realizou experimentos nos Estados Unidos, foi observado o surgimento de trincamento em camadas de material reciclado quando ocorreu liberação precoce do tráfego sobre tais camadas (tempo de cura curto).

### **2.2.2 Normatização nacionais**

Pesquisas estão sendo desenvolvidas no país com o foco para o desenvolvimento de um método de dosagem, a fim de se utilizar o material fresado para o emprego em base e sub-base de rodovias. A utilização de estabilizadores químicos como o cimento Portland não possui ainda um método de dosagem normatizado, porém, existem algumas especificações de serviços como DEINFRA-SC (2012), DER-PR ES-P 33/05 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento (DER-PR, 2005), DER-SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita (DER-SP, 2006), DNIT-ES 167/2013 – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço (DNIT, 2013a), as quais estabelecem indicações de como se proceder quanto:

I) As amostras que devem ser coletadas com o auxílio da recicladora utilizada nos serviços, sendo que essa deve ser feita para cada segmento homogêneo encontrado na rodovia, elaborando-se então, um projeto de dosagem específico para cada variabilidade encontrada; e

II) Ao projeto de dosagem que deve conter no mínimo informações sobre a composição granulométrica da mistura e enquadramento na faixa de trabalho, umidade ótima e massa específica aparente seca máxima da mistura reciclada e energia de compactação.

### 2.2.3 Normatizações e métodos internacionais

Internacionalmente existem alguns procedimentos e manuais que tratam sobre o assunto reciclagem e aplicação do RAP em novas obras viárias a partir de ensaio de caracterização e adições química (estabilização granulométrica e cimentícia).

#### 2.2.3.1 Dosagem pelo Método da Wirtgen

O Manual de Reciclagem a Frio da Wirtgen (2012) empresa da área de fabricação de recicladoras, propõem um método considerado minucioso devido aos detalhes propostos em sua execução, sendo um deles a retirada de no mínimo 100kg de cada material do campo, para realização da análise de propriedades individual e com mistura.

A partir dos ensaios de granulometria, a composição deve se enquadrar nos limites propostos pela empresa e caso isso não ocorra, deve-se adicionar materiais virgens a mistura para corrigir a deficiência existente, conseguindo enquadramento dos materiais utilizados na curva adotada. Além do ensaio granulométrico, segundo tal manual deve-se realizar o ensaio de compactação na energia modificada (WIRTGEN, 2012).

Para o método proposto não é estabelecida uma porcentagem máxima de material fresado, sendo que a proporção de cada material é definida a partir da espessura das camadas e massa específica *in situ* dos materiais. A compactação deve ser realizada em energia Modificada. Para o teor de cimento o referido manual não referência um percentual, apenas descreve que o percentual deve ser coerente com o material coletado. Visando reproduzir possíveis atrasos que venham ocorrer *in loco*, a mistura deve esperar uma hora para assim se iniciar a compactação (WIRTGEN, 2012).

De acordo com os parâmetros de compactação descritos por tal método, são moldados três corpos de prova para cada teor de cimento (no mínimo três), realizando os ensaios de RCS e RTCD após 7 dias de cura, sendo dois corpos de prova a resistência a compressão simples (RCS), e um a resistência a tração por compressão diametral (RTCD). Ainda para a RCS, os CPs devem ser imersos por 4 horas.

Com os valores de RCS, correlaciona-se o teor de cimento por meio de um gráfico, definindo assim o teor ideal a ser adotado para o projeto. A partir da resistência de projeto, deve-se definir o teor de cimento a ser adotado. A Tabela 12 traz as categorias propostas pelo manual para materiais reciclados com adição de cimento as quais se relacionam com a RCS aos 7 dias de cura (WIRTGEN, 2012).

Tabela 12 – RCS aos 7 dias de cura

<b>Tipo de Material</b>	<b>RCS 7 dias (MPa)</b>
Levemente cimentado	< 4
Cimentado	4 a 10

Fonte: (Adaptado de Wirtgen, 2012).

### *2.2.3.2 Método da Portland Cement Association (PCA)*

O método desenvolvido pelo PCA (2005) consiste essencialmente da análise de duas características para a dosagem de misturas recicladas tratadas com material cimentante. A primeira seria a análise granulometria, a qual deve ser enquadrada dentro da faixa especificada pela organização, ainda referencia que o RAP não deve ser superior a 50% da massa total da mistura na composição.

De posse da granulometria correta, realizam-se os ensaios de compactação na energia Normal, com uma mistura reciclada e um teor estimado de cimento. A partir dos parâmetros obtidos, realiza-se a moldagem de dois corpos de prova (CPs) para três teores de cimento e posterior à cura de 7 dias, realiza-se o ensaio de resistência à compressão simples.

De posse dos resultados do ensaio de RCS, define-se o teor de cimento ideal para que se atinja os parâmetros estabelecido pela PCA (2005) os quais devem se enquadrar dentro dos limites propostos que variam entre 2,1 e 2,8 MPa.

### *2.2.3.3 Método da Austroads*

Austroads (2002) principal órgão rodoviário da Austrália e Nova Zelândia, desenvolveu um método de dosagem para utilização de materiais reciclados, estabilizados com cimento, para uso em camadas de pavimentos. Tal procedimento foi utilizado em pesquisas que tratam de reciclagem e estabilização química.

Inicialmente para tal método deve ocorrer uma análise granulométrica, com o objetivo de verificar a necessidade de correção com o uso de material virgem.

A caracterização das misturas ocorre a partir do ensaio de compactação na energia normal e modificada sem adição de cimento. De posse dos parâmetros realiza-se a análise do comportamento mecânico, analisando a RCS dos CPs com 28 dias de cura. Além disso, deve-se averiguar a taxa de ganho da RCS entre os 7 e 28 dias de cura. Ainda são sugeridos, ensaios de ascensão capilar e absorção, retração por secagem, visando diminuir os riscos dos danos à camada reciclada provocados pela umidade, as trincas indesejadas e também erosão.

#### *2.2.3.4 Outros Método de dosagem*

A *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*, desenvolveu um método considerado de simples aplicação, pois, não estabelece percentuais de cimento e resistência de projeto, a dosagem proposta pela ARRA (2001) é determinada pelos seguintes passos:

I) Verificação das propriedades do material reciclado, com ensaios granulométricos, determinação do índice de plasticidade (IP) dos materiais para verificação se existe necessidade de adição de materiais virgens e certificar que o cimento agirá como agente estabilizador;

II) Determinação das proporções de material reciclado, cimento e umidade, a partir de ensaios de compactação, variando-se em no mínimo 1% as taxas de aplicação. De acordo ainda com a associação deve-se prever a reprodução de possíveis atrasos que podem ocorrer em campo, deixando em repouso as amostras homogêneas entre duas e quatro horas, antes de se compactar; e

III) Avaliação do comportamento mecânico das misturas, realizado com ensaios a compressão simples, com no mínimo 3 corpos de prova, com tempos de cura de 7 dias. Tais CPs, devem ser elaborados a partir da umidade ótima, curados em câmara úmida de 95 a 100% e temperaturas entre 22 e 25° C. Sendo ainda que podem ser empregadas outras temperaturas e diferentes tempos de cura.

O *Instituto Español Del Cemento y SUS Aplicaciones* (IECA, 2013) elaborou um método de dosagem de misturas recicladas constituído de cinco etapas:

I) Divisão em segmentos homogêneos para realização de diferentes projetos de dosagem – deve ser feita considerando o tráfego, o tipo e o estado do pavimento, dentre outros fatores;

II) Caracterização das misturas, a qual ocorrerá com a análise granulométrica, para verificação da necessidade de adição de agregados virgens, ainda devem ser determinados os limites de Atterberg dos materiais envolvidos, dessa forma compatibilizando a estabilização com cimento;

III) Determinação das características mecânicas das misturas, tal método determina a realização de ensaios de compressão simples, em energia modificada, com no mínimo três teores de cimento, os quais devem ser iguais ou superiores a 4%. O grau de compactação (GC) deve ser de no mínimo 97% e a RCS de projeto varia conforme o nível de tráfego e da resistência do subleito. É estabelecido um valor mínimo de 2,5 MPa, sendo o mesmo aumentado conforme a redução da espessura da camada reciclada, podendo chegar a 3,5 MPa;

IV) Análise de sensibilidade de acordo com a variação do grau de compactação – devem ser realizados ensaios com GC de 95 e 96% para verificação; e

V) Determinação do prazo de trabalhabilidade do material reciclado – verificação do período de tempo entre o final da homogeneização da mistura e o início da pega do cimento.

#### *2.2.3.5 Comparativo entre os métodos*

A tabela 13, traz os métodos descritos anteriormente sintetizados.

Tabela 13 – Análise dos métodos internacionais citados

Característica	Método de dosagem				
	PCA (2005)	IECA (2013)	Wirtgen (2012)	ARRA (2001)	Austrroads (2002)
Ensaios preliminares	Análises granulométrica	nálise granulométrica; Limites de Atterberg	nálise granulométrica; Limites de Atterberg	nálise granulométrica; Limites de Atterberg	nálise granulométrica; Limites de Atterberg
Controle da granulometria	Estabelecida	Não estabelece	Estabelecida	Não estabelece	Estabelecida
máximo de fresado asfáltico (%)	50	Não estabelece	Não estabelece	Não estabelece	Não estabelece
Energia de compactação	Normal	Modificada	Modificada	Normal ou Modificada	Normal ou Modificada
o parâmetro para dosagem	RCS	RCS	RCS	RCS	RCS
ensaios dos corpos de prova para RCS	CPs cilíndricos (10,16 cm x 11,64 cm)	Não estabelece	Indo de Proctor grande (ISC)	Não estabelece	Não estabelece
Teor esfúpicos de cimento	Não estabelece	4% (mínimo sugerido)	2% a 4%	Não estabelece	1% a 5,5%
número de teores de cimento para RCS	3	Não estabelece	3	Não estabelece	Teores crescentes até que se atinja a RCS
número de corpos de prova para RCS	2	3	2	3	Não estabelece
Tipo de cura	Convencional	Convencional	Convencional ou acelerada em estufa	Convencional	Convencional ou acelerada em estufa
tempo de cura para RCS (dias)	7	7	7	7	opção para 28 dias
RCS (MPa)	2,1 a 2,8	> 2,5 MPa	Tabela 12	Não estabelece	Tabela 11
condicionais indicados	Não estabelece	Sensibilidade do grau de compactação; Prazo de trabalhabilidade	Resistência à tração por compressão diametral	Durabilidade; Sensibilidade à umidade	Ascensão capilar, absorção e expansão; Retração; Erodibilidade

Fonte: (Adaptado de Fedrigo, 2015).

## 2.3 PESQUISAS REALIZADAS COM MATERIAL FRESADO

Para existir embasamentos e descrever melhor a necessidade de conhecer uma técnica de dosagem para material reciclado (fresado) estabilizado granulometricamente e quimicamente serão abordados neste item, trabalhos realizados sobre tal assunto nacional e internacionalmente. Ainda serão apresentados dados para serem utilizados como comparativo aos resultados alcançados.

### 2.3.1 Pesquisas nacionais

Oliveira (2003) utilizou cimento Portland CP II-E, com material de fresado e agregado natural em percentual de 77% fresado com adição de material natural (variável dependendo do percentual de cimento). As comparações foram realizadas através da RCS, para o tempo de cura de 7 dias. Em seus experimentos usou a energia Normal de Proctor para compactação com teores de cimento de 3%, 4% e 5%. Os resultados de resistência a compressão simples apresentaram redução da resistência, quando ocorre o retardamento da compactação após iniciado as reações do cimento. Para a mistura inicial ou primeira moldagem, obteve valores para o teor de 3% de cimento de 2,41MPa, para 4% cimento de 2,53MPa e 2,82MPa para 5% de cimento. Ainda Oliveira et al. (2005) usando um trecho experimental na rodovia SP-351, entre Bebedouro e Palmares Paulista, descrevem que o valor mínimo de resistência de 2,5 MPa, aos 7 dias de cura foi atingido somente com a adição e 5% de cimento em massa. O material fresado utilizado no experimento, foi proveniente da mesma rodovia sendo constituído de 5,0cm de capa e 15cm de base aproximadamente. Ocorreu ainda a adição de 10% de brita 1 e 2. A energia de compactação utilizada foi a modificada de Proctor com cimento Portland CP III.

Dellabianca (2004) realizou ensaios com material fresado e cascalho laterítico, em teores de 16%, 20%, 25% e 35% (material fresado). Com e sem adição da cal hidratada, utilizando o cimento CP II-F, sendo o teor de 2% para ambos. Para condições de compactação intermediária de Proctor. Seu estudo forneceu dados de ISC, cisalhamento e módulo. Outro fato relatado pelo autor, refere-se a película formada pelo ligante, a qual envolve os grãos do material fresado, influenciando as propriedades da mistura. Reduzindo o ângulo de atrito interno, aumento do repique

elástico durante o ensaio de compactação e confere ao fresado uma componente de deformação viscosa, desta forma diminuindo o ISC, RCS e módulo de resiliência. O ensaio com adição de material cimentante ocorreu apenas para o teor de 25% de material fresado, tendo resultados de 0,1 a 1,15 MPa para a adição da cal dependendo do tempo de cura da amostra.

Gusmão (2008) realizou ensaios de RCS e RTCD em misturas com material reciclado com adições de cimento, usando a BGS como material padrão. Sendo avaliados tempos de cura de 1, 3 e 28 dias, para o teor de cimento de 3% em massa, a compactação ocorreu na energia intermediária de Proctor, o percentual de material fresado variou de 40%, 50% e 60%. Foram obtidos resultados satisfatórios, entre 0,91MPa para o 1º dia de cura e 2,15 MPa para o 28º dia de cura no percentual de 40% fresado e 3% de cimento, ainda de 0,57 (1º dia de cura) e 2,07 MPa (28º dia de cura) para 50% fresado e 0,47 (1º dia de cura) a 2,1MPa (28º dia de cura) para 60% fresado, ambos para o mesmo percentual de cimento e mesmos períodos de cura. Na pesquisa foi evidenciado o ganho de resistência devido ao tempo de cura e também foi perceptível a diminuição da resistência das misturas com o aumento da participação do material fresado.

Paiva e Oliveira (2010) ressaltaram a influência da umidade ótima e da compactação em mistura de material reciclado com adições de cimento Portland. Foram avaliados ensaios de RCS e RTCD, aos 7 dias de cura, com grau de compactação de 90% a 100%, para umidade ótima variando em 1%. A composição das misturas foi de 77% fresado asfáltico com 20% de agregado virgem e 3% de cimento CII E - 32, com energia modificada de Proctor. Os resultados alcançados confirmaram que a RCS e a RCTD, são proporcionais ao grau de compactação, desta forma o GCs influência na melhoria ou acréscimo de resistência. Outro fator relevante de tal pesquisa foi o ganho de resistência quando utilizado umidade de 1% acima da umidade 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. A Tabela 14 demonstra resumidamente os resultados alcançados por tais autores.

Tabela 14 – Resultados de Paiva e Oliveira (2010)

Grau de Compactação	Umidade ( $\omega$ )	Média (RCS) MPa	Média (RTCD) MPa
90%	5,60%	0,72	0,10
	6,60%	0,77	0,13
	7,60%	0,96	0,14
92%	5,60%	1,07	0,14
	6,60%	1,26	0,22
	7,60%	1,25	0,25
95%	5,60%	1,1	0,26
	6,60%	1,66	0,27
	7,60%	1,33	0,32
97%	5,60%	1,66	0,34
	6,60%	1,65	0,27
	7,60%	2,13	0,36
100%	5,60%	1,65	0,40
	6,60%	1,7	0,31
	7,60%	2,28	0,45

Fonte: (Adaptado de Paiva e Oliveira, 2010).

Trichês e Santos (2011) realizaram experimentos na SC-303 no trecho entre Joaçaba e Capinzal, o qual foi constituído de 30km de pavimento reciclado. O pavimento analisado possuía espessura de 20cm (8cm de revestimento e 12cm de base. Os percentuais de material, foram de 15% material virgem, 3% de cimento Portland e 82% de material reciclado, todos em massa. A energia de compactação utilizada foi a modificada do ensaio Proctor. Tal pesquisa teve grande amplitude no meio acadêmico, podendo a mesma ser dividida em etapas distintas, as quais avaliaram resistência mecânica das misturas com cimento, geração de ganhos de resistência e rigidez devido ao uso do estabilizador químico, e a influência do tempo de cura no comportamento mecânico. Na pesquisa de tais autores foram avaliadas a RCS, RTCD e a Resistência na Tração na Flexão (RTF). Para resultados de RTF foi verificado que o mesmo possui uma variação entre 0,15 a 0,24 da RCS (dependendo do valor de cimento adotado na mistura) e ainda tais resultados demonstram que pode-se utilizar a RTCD para a análise da RTF. Na análise da pista experimental, foi observada a redução nas deflexões medidas com auxílio de viga Benkelman, após três dias de cura, ainda foi observada a liberação do tráfego veicular entre o terceiro e sétimo dia. Em nova avaliação no ano de 2013, com a utilização de FWD (*Falling Weight Deflectometer*), foram medidas as deflexões de

trilhas de roda, os resultados demonstraram que a camada reciclada não apresentava trincas por fadiga, em relação à trilha de roda, 98% do trecho apresentou valores baixos (inferior a 6 mm). Os autores alertam que se deve ter atenção com as trincas por retração, dado que podem levar ao colapso da estrutura. A Tabela 15 demonstra os valores encontrados nos ensaios realizado por tais autores.

Tabela 15 – Análise dos métodos internacionais citados

Percentual de Cimento (%)	Cura (Dias)	Média (RCS) MPa	Resistência Tração na Flexão (MPa)	Resistência à Tração Indireta (MPa)
3,0	3	0,97	0,24	0,21
	7	1,63	0,34	0,34
	28	2,49	0,5	0,52
3,5	3	-	-	-
	7	2,06	0,36	0,37
	28	3,31	0,63	0,65
4,0	3	-	-	-
	7	2,85	0,48	0,45
	28	4,3	0,7	0,71
4,5	3	-	-	-
	7	3,33	0,52	-
	28	4,84	0,82	-

Fonte: (Adaptado de Trichês e Santos 2011).

Nunes *et al.* (2013) verificou o desempenho de uma mistura de 78% de material fresado e 22% de material virgem (rocha basáltica) empregado na região de Passo Fundo-RS, com teores de 1%, 2%, 4% e 8% de cimento Portland CP V ARI, compactados em energia modificada de Proctor, com tempo de cura de 7 dias. Os resultados obtidos variaram de 0,69 MPa a 5,66 MPa na RCS, elevando a resistência conforme aumento do percentual de cimento. Sendo que a partir de 3,5% de cimento, conseguiu-se atingir a resistência de 2,1 MPa aos 7 dias de cura, resistência mínima, conforme preconiza a norma DNIT167/2013-ES.

Paiva e Oliveira (2013) analisaram uma mistura contendo 30% de revestimento asfáltico fresado e 70% de base de solo-cimento, original do pavimento, com a estabilização química de 3% de cimento Portland CP II-E32. Os resultados alcançados para RCS e RTCD, foram de 2,47 MPa e 0,22 MPa, utilizando-se a energia modificada de Proctor para compactação, com tempo de cura

de 7 dias. Os valores encontrados demonstram que, mesmo em percentuais baixos de cimento é possível encontrar valores satisfatórios de resistência em tais misturas.

Aranha (2013) em seus experimentos avaliou o comportamento mecânico de misturas com material reciclado de solo-agregado com cimento a partir de estudos de campo e laboratório. Em sua análise experimental foi avaliado a RCS, RTCD e módulo de resiliência triaxial, para diferentes percentuais de material reciclado, com teor de cimento de 5% em massa, para energia de compactação intermediária e modificada, com tempo de cura de 3, 7 e 28 dias. Tendo valores para a energia intermediária de 0,42MPa, 0,62MPa e 0,9MPa aos 3, 7 e 28 dias, para o ensaio de RTCD. Já para RCS os valores foram de 4,2MPa e 5,8MPa para cura aos 7 e 28 dias, ainda realizou ensaio de MR obtendo valores de 5800MPa e 7900MPa para 7 e 28 dias de cura. Ainda na avaliação entre as energias de compactação cabe ressaltar, como já descrito por outros autores, que a mesma, possui grande influência sobre a resistência final. Os valores encontrados foram de 4,2MPa (intermediária) e 6,1MPa (modificada) para 7 dias de cura. Já para o período de 28 dias foi de 5,8MPa (intermediária) e 8,8MPa (modificada) para o ensaio de RSC.

Ely (2014) realizou experimentos utilizando 70% de material fresado, com brita graduada simples, para o teor de cimento Portland igual a 4%, (CPII-E-32), compactados em energia intermediária e modificada de Proctor. A análise de cada mistura foi baseada no comportamento mecânico, avaliando a RCS, RTCD e MR, para tempos de cura de 3, 7 e 14 dias. Obteve valores de resistência entre 1,29 e 2,72MPa, para RCS, já para RTCD entre 0,19 e 0,45MPa e de 3.825 e 8.420MPa para MR.

D'Avila (2015) analisou misturas de 20%, 50% e 70% de RAP, tratados com 2%, 4% e 6% de cimento Portland CP-II-E-32, compactados em energia modificada de Proctor, para o tempo de cura igual a 28 dias. A avaliação foi feita com base nos valores de RTF, para misturas constituídas de BGTC e fresado asfáltico (existia a presença de polímero no fresado do revestimento). Foram encontrados valores de 0,32MPa para 2% cimento e 20% RAP, até valores de 1,34 MPa para misturas com 6% cimento e 70% RAP, nos ensaios de RTF. Foi verificado ainda que o acréscimo de RAP nas misturas não afetou o ganho de resistência à flexão das mesmas, para teores iguais de cimento, sendo os valores encontrados muito próximos. Já o teor de material cimentante influenciou nos resultados alcançados, uma vez que a adição de cimento aumentou significativamente a RTF.

Kleinert (2016) analisou os efeitos da porcentagem de fresado, teor de cimento e do tempo de cura, utilizando CPs compactados com energia modificada do ensaio Proctor. Os teores de cimento variaram de 1% a 7%, o percentual de material fresado variou entre 8% e 92%. Os tempos de cura considerados variaram de acordo com o ensaio, sendo de 3, 7 e 14 dias para os ensaios de comportamento mecânico e de 7 dias para os demais ensaios. No estudo foi verificado que todas as variáveis citadas afetam as propriedades analisadas, contudo o teor de cimento demonstrou maior efeito, sendo que sua adição melhora consideravelmente o comportamento das misturas empregadas, frente à ação do tráfego e da água. 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), já para a rigidez das misturas apresentou uma ampla variação de resultados (484 MPa a 20.031 MPa).

López (2016) realizou ensaio de fadiga, em material fresado tratado com cimento em percentual de 20%, 50% e 70% de fresado, brita graduada e cimento Portland em percentual de 2% e 4% para compactação modificada do ensaio de Proctor. O programa utilizado foi baseado no protocolo para caracterização de materiais cimentados da *Austroads* (2008), para os ensaios estáticos e de fadiga, além de recomendações para caracterização flexural da JCI (1984). A cura realizada foi de 28 dias (vigotas). Foram obtidos resultados de ensaios estáticos os quais indicam a predominância da influência do teor de cimento na resistência a tração na flexão das misturas, ficando tais valores entre 0,21 MPa e 1,53 MPa. A porcentagem de fresado tem efeito significativo na deformação de ruptura, tornando as misturas mais dúcteis, e no Módulo de Elasticidade Flexural ficou entre 1.483 MPa e 12.800 MPa. No caso dos ensaios de fadiga de quatro pontos, que consiste na utilização de vigotas, nas quais são aplicados pulso de carga do tipo semiseno-seno-verso (tempo de carga e de descanso 0,25 s), do tipo TC, na faixa 60 % - 90 % da RTF. O qual após uma carga de acomodamento, o carregamento deve produzir uma deformação na faixa de 50 até 100 microstrains (1 microstrain =  $1 \mu\epsilon = 10^{-6}$  mm/mm). O MRF corresponde à média dos primeiros 50 ciclos de carregamento. Nesta etapa foram obtidos Módulos entre 2913MPa e 7725MPa, desta forma mostrado a dependência do teor de cimento independentes do nível de tensão. Ainda tal pesquisador cita que para espessuras de camada reciclada inferiores a 30 cm terão curta vida a fadiga. Por outro lado, ainda, a vida do pavimento em relação a fadiga é dependente da

espessura da nova camada asfáltica sobrejacente, recomendando-se espessuras de no mínimo 10 cm.

Pasche (2016) correlacionou o índice de porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/Civ$ ), com parâmetros de rigidez e resistência das misturas. Os experimentos foram realizados com teores de 70% de material fresado e 30% de pó-de-pedra (ocorreu estabilização granulométrica), a estabilização química, foi feita com cimento Portland CP-V ARI, em teores de 3%, 5% e 7%. Os parâmetros analisados foram a RCS, RTCD, módulo de resiliência e módulo complexo, das misturas, para um tempo de cura igual a 28 dias. Os valores variaram entre 0,708MPa e 4,60MPa para 3% cimento com densidade de 2,0g/cm<sup>3</sup> e 7% cimento e densidade de 2,2g/cm<sup>3</sup>. O ensaio de RTCD e MR para as respectivas densidades e teores de cimento foram de 0,116MPa e de 0,719MPa (RTCD) e para o MR de 5.872,33MPa e de 11.764MPa, para média de três valores. Tais resultados demonstraram que tanto as resistências como os módulos, aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cimento e exponencialmente com a redução da porosidade. Ainda foi verificado propriedades visco elásticas oriundas do material fresado.

Silva (2018) utilizou os percentuais de 70% material fresado e 30% pó-de-pedra, com emprego de 4%, 5% e 6% de cimento Portland CP-V ARI em relação a massa da mistura, para tempos de cura de 7 e 28 dias, compactados em energia normal, intermediária e modificada de Proctor, obtendo valores de RCS aos 7 dias de cura de 1,84MPa para 4% cimento com densidade de 1,9g/cm<sup>3</sup>, e de 5,36MPa para 6% cimento, com densidade de 2,1g/cm<sup>3</sup>, já os valores de RTF foram de 0,11MPa (4% cimento e 1,9g/cm<sup>3</sup>) e 0,78MPa (6% cimento e 2,1g/cm<sup>3</sup>) para o mesmo período de cura. Ainda para o ensaio de RTCD e MR foram encontrados valores entre 0,21MPa (4% cimento e 1,9g/cm<sup>3</sup>) e 0,80MPa (6% cimento e 2,1g/cm<sup>3</sup>) para a RTCD e de 4.800MPa (4% cimento e 1,9g/cm<sup>3</sup>) e 11.100MPa (6% cimento e 2,1g/cm<sup>3</sup>) de MR, os valores são referentes à média de três CPs, para um período de cura de 7 dias e as densidades são de 1,9g/cm<sup>3</sup> (energia normal) e 2,1g/cm<sup>3</sup> (energia modificada). O emprego do material fresado em substituição ao agregado natural é satisfatório segundo tal autor e ainda o mesmo enfatizou a relação existente entre a porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/Civ$ ), para parâmetros de rigidez e resistência das misturas utilizadas. Cabe lembrar que o mesmo ainda

realizou ensaios para períodos mais longos os quais evidenciaram o acréscimo de resistência nos CPs devido ao tempo de cura.

### 2.3.2 Pesquisas realizadas no exterior

Neste item serão apresentadas algumas pesquisas realizadas internacionalmente a respeito do tema central de utilização de material fresado estabilizado quimicamente e granulometricamente.

Delwaret *al.* (1997) realizou estudos com RAP, introduzindo o mesmo em misturas de concreto plástico, verificando as características mecânicas das misturas. Foi observado que quanto maior o percentual de RAP da mistura, menor é a tensão de ruptura. O aumento de RAP no concreto diminui a rigidez da mistura.

Delwaret *al.* (1997) e Huang *et al.*(2005) observaram que a fratura nas amostras de concreto contendo RAP é do tipo abrupta, também que o mesmo possui uma melhor tenacidade, ductilidade e comportamento elástico, quando comparado ao concreto.

Tahaet *al.* (2002) realizou experimentos usando 0% a 100% de RAP, adicionando-se percentuais de 0% a 7% de cimento Portland e ainda percentuais de material virgem. Em seus resultados a RCS aos 7 e 28 dias de cura, foi verificado a tendência de acréscimo de resistência com o acréscimo de material virgem, percentual de cimento e tempo de cura, porém, tais misturas segundo o autor podem ser usadas em bases recicladas, desde que estabilizadas quimicamente. Ainda se constatou que a influência da adição de cimento é mais expressiva do que a inclusão de agregado virgem.

Mathiaset *al.* (2004) buscaram a utilização do RAP no emprego de novas técnicas na França. Avaliando o comportamento a fadiga de misturas de RAP, para concretos vibrados e compactados a rolo, para percentuais de 0% a 50% de RAP. Em seus experimentos, tais autores, relatam a diminuição na resistência à tração e no módulo de elasticidade da mistura quando o RAP é incorporado. Em relação à fadiga, o RAP leva a uma diminuição na tensão medida nos ensaios, devido à queda nos valores de resistência à tração na flexão.

Huang *et al.* (2005) desenvolveu estudos substituindo os agregados virgens por RAP (fino e graúdo), observando suas características mecânicas, com acréscimo

de sílica ativa e super-plastificante, analisando os concretos aos 28 dias de cura, na RCS. Suas comparações foram com 100% de material virgem e com substituição de todo o agregado graúdo por RAP e realizados os mesmos ensaios para substituição do agregado miúdo por RAP. Os resultados demonstraram diminuição de 75% da resistência original para substituição de 100% do agregado virgem graúdo por RAP, obtendo valores de 41,3 MPa (RCS inicial do agregado virgem) e 10,5 MPa (com a substituição por RAP). Para o agregado miúdo a resistência à compressão diminuiu para 19,1 MPa, quando ocorreu a substituição total de agregado virgem miúdo por RAP (redução foi superior a 50%).

Moreira *et al.* (2006) realizou experimentos com utilização de 100% RAP, os quais apresentaram grande variação de comportamento, devido ao volume de vazios, perda de aderência entre o RAP e o cimento, pela presença de ligante e ocorrência de microfissuras, devido à ausência de material fino na composição. Para poder atingir valores mínimos do Manual de Concepção de Pavimentação da Espanha (Macopav), de RCS 2,5 MPa e RTCD 0,3 MPa, utilizou a composição de 70% fresado e 30% pó de pedra, com adição de 6% de cimento Portland CEMII – 32,5 N.

Hossiney *et al.* (2008) realizou pesquisas em laboratório variando o percentual de RAP em concretos para pavimentos rígidos, a análise baseava-se em elementos finitos, seus resultados mostravam que, as RCS, RTCD e o módulo de elasticidade, diminuíram com aumento do percentual de RAP, quando considerando concretos como referência.

Isola *et al.* (2013) obteve resultados para misturas de 30% e 70% de material fresado com adições de 50% de agregado fino e 20% de agregado graúdo, ainda, 10% agregado fino e 20% agregado graúdo, para os respectivos percentuais de fresado. A mistura base foi tomada como sendo 70% agregado fino e 30% agregado graúdo. Os resultados demonstraram que foi atingido o valor de RCS de 3 MPa, aos 7 dias de cura, para satisfazer a resistência mínima desejada pela norma Italiana ( $2,5 \text{ MPa} \leq \text{RCS} \leq 4,5 \text{ MPa}$  e  $\text{RTCD} > 0,25 \text{ MPa}$  aos 7 dias de cura), com percentual de cimento variando de 3,56% e 3,97% para as misturas com fresado e 2,9% para mistura de referência. Desta forma aumentando o teor de cimento com acréscimo do RAP.

Yang e Wu (2014) buscaram uma mistura que se enquadrasse nos valores estipulados de RCS da PCA (2,1 a 2,8 MPA), para isso desenvolveram cinco

misturas com material reciclado com adições de cimento, variando entre 0% a 100% para o fresado e material da base, com teores de cimento entre 0,5% a 2,5%. Ainda ocorreu a estabilização granulométrica com material virgem. Os resultados de RCS ficaram entre 0,36 MPa para 100% fresado e 0,5% de cimento e 5,15 MPa, para a mistura de 100% base e 2,5% cimento, para um período de cura igual a 7 dias.

## 2.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA, RIGIDEZ E DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE

### 2.4.1 Resistência à compressão simples (RCS)

De acordo com Kleinert (2016) o ensaio de Resistência a Compressão Simples ou de resistência não confinada (RCS), é imprescindível quando se trata de experimentos com materiais reciclados com adições cimentícias, devido a sua fácil realização e frequência com que é empregado em grande parte das pesquisas relacionadas ao tema, fazendo com que seja de fácil comparação.

Devido à falta de normatizações para o emprego de material reciclado, foi observado o que prescreve a DNER – ME 180/1994. Além de parâmetros usados para a confecção da BGTC, constantes na NBR 11803/2013 e NBR 12261/2013.

O valor de RCS é a razão entre a carga de ruptura e a seção transversal do CP. Conforme apresentado na Equação 2.

$$RCS = \frac{F}{\pi \times r^2} \quad (2)$$

Onde:

$RCS$  =resistência há compressão (MPa);

$F$  =carga de ruptura (N);

$r$  =raio do corpo de prova (cm).

### 2.4.2 Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

Quando o pavimento está submetido aos carregamentos do tráfego, o mesmo sofre esforços em diferentes posições das camadas, as quais constituem sua

estrutura. A geração de tração por flexão da parte inferior da camada, deve ser resistida por coesão ou cimentação. Desta forma o ensaio de RTCD, tem grande importância. Tal ensaio determina a máxima tensão de tração que o corpo de prova pode ser submetido, quando sujeito à carregamento por compressão diametral. Ainda, autores como Ingles & Metcalf (1972) descrevem que o conhecimento a respeito da RTCD é de grande interesse para misturas cimentadas, devido a solicitação sofrida pelo pavimento quanto a ação do tráfego. Ainda os mesmos sugerem que a RTCD é de aproximadamente 10% da RCS, quando se adotam as mesmas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

O ensaio de RTCD ocorre da seguinte forma:

- Os corpos de prova foram os mesmos utilizados no ensaio de MR;
- Condicionamento de 12 horas dos CPs, a temperatura de  $25 \pm 0,1$  °C;
- Os CPs possuíam altura de 60mm e diâmetro de  $100\text{mm} \pm 2\text{mm}$ ; e
- Para tal ensaio foi observado o prescrito na norma DNIT 136/2010.

O ensaio ocorre com a aplicação de uma carga estática de compressão, com velocidade controlada, distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obterem as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicular à carga. Tendo como a medida resultante a resistência à tração (RT).

A obtenção dos valores de RTCD, dos CPs ensaiados são gerados pela Equação 3.

$$RTCD = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (3)$$

Onde:

RTCD = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = Altura do corpo de prova (cm).

#### **2.4.3 Módulo de resiliência (MR)**

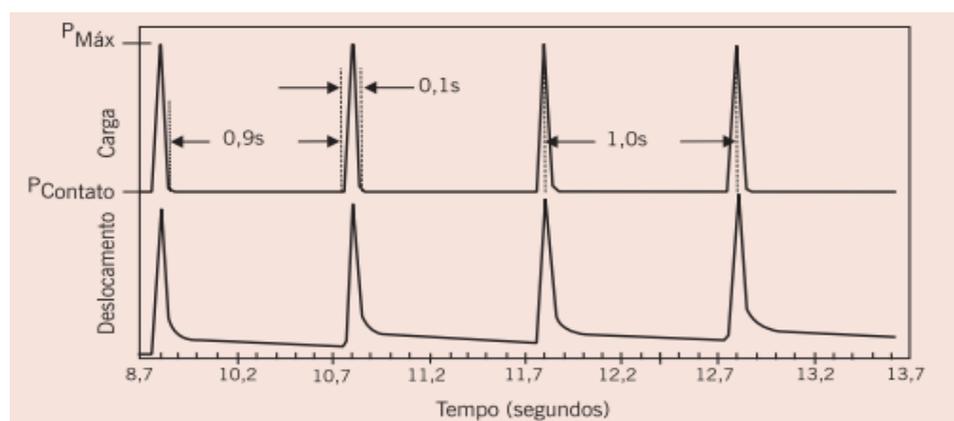
De acordo com Kleinert (2016), resiliência é a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, retornando sem danos assim que as tensões param de serem aplicadas. Já o módulo de resiliência é um método aceito internacionalmente

para caracterizar materiais tanto para o projeto de pavimentos como para sua avaliação de desempenho.

O Módulo de Resiliência (*resilient modulus* em inglês) teve sua criação para que não fosse confundido com o Módulo de Young, determinado estaticamente Hveem (1955). Para Aranha (2013) a rigidez de dado material é expressa pelo módulo de resiliência quando se trata de um material granular e módulo de elasticidade quando se trata de concreto. Para Huang (1993) o módulo de resiliência é o módulo de elasticidade para ser usado com a teoria da elasticidade. Pois a maioria dos materiais empregados em pavimentação não possuem características elásticas, porém apresentam alguma deformação permanente depois de cada aplicação de carga. Ainda quando se tem cargas pequenas comparadas a resistência do material, com demasiado número de repetições, a deformação sobre cada repetição de cada carga é quase completamente recuperável e proporcional a carga, desta forma podendo ser considerado o regime elástico.

Para se ter os valores correspondentes ao MR das misturas ensaiadas, é aplicada a Equação 4, a qual leva em consideração os valores recuperáveis de deslocamento horizontal a partir da carga aplicada. Tais valores são fornecidos pelo software, através de sensores. A Figura 6 demonstra a carga e descarga para o ensaio de MR

Figura 5 – Carregamento/Repouso do ensaio MR



Fonte: (Adaptado de Bernucci et. al., 2010).

$$MR = \frac{P}{\Delta \times H} (0,9976 \times \mu + 0,2692) \quad (4)$$

Onde:

$MR$  = módulo de resiliência (MPa);

$P$  = carga vertical aplicada diretamente no corpo de prova (N);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga (cm);

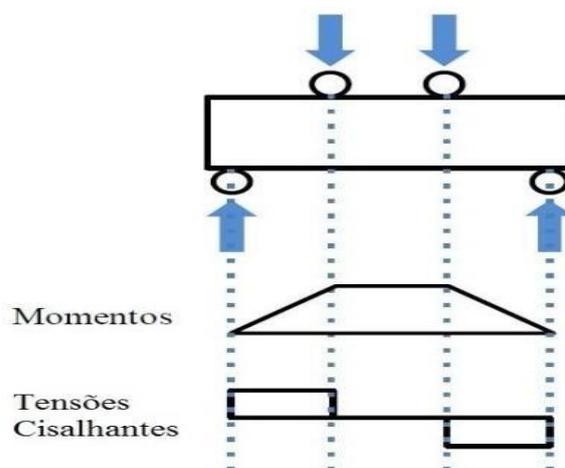
$H$  = altura do corpo de prova (cm);

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

#### 2.4.4 Resistência à tração na flexão (RTF)

O ensaio de resistência à tração na flexão (RTF) consiste na aplicação de um carregamento estático sob tensão controlada, a uma taxa constante em uma vigota. Este ensaio permite estabelecer níveis de carga a serem usados nos ensaios dinâmicos. Além dessa caracterização, é possível fazer análises das curvas tensão-deformação, isto é, em termos de tensão na flexão, da deformação específica de tração ao longo do ensaio até a ruptura, do Módulo Elástico Flexural (MEF). A Figura 7, traz a distribuição de tensões e momento, já a Tabela 16, traz comparações do ensaio de RTF, segundo metodologias existentes.

Figura 6 – Tensões e momento da configuração de quatro pontos



Fonte: (Adaptado de Salvador et al., 2013).

Tabela 16 – Comparativo entre normas nacional e internacional

Critério/Norma	JSCE-SF4 (1984)	ASTM D1635 (2012)	NCHRP - 789 (2014)	AUSTROADS (2008)	ASTM C78 (2015)	NBR 12142 (2010)
Material	Concreto reforçado com fibras de aço	Solo-cimento	Misturas cimentadas		Concreto	
Modo de carregamento	DC	DC, TC	TC			
Taxa carregamento	mm/min 0-L/600: 0,06 a 0,12	mm/min 0,02	Kpa/min 690 +/- 39	Kpa/min 990	Kpa/min 900-1200	Kpa/min 900-1100

	L/600-L/150: 0,06 a 0,24	Kpa/Min 690+/-39				
Dimensões corpo de prova (mm)	100x100x350; 150x150x500	76x76x290	102x102x400	100 x 100 x 400	100x100x400 150x150x500	150x150x500 100x100x400
Vão (mm)	300; 450	228	300	300	300;450	360;450
Tempo de cura (dias)	Não específica	28			Não específica	
Número de LVDTs	2	Nenhum		1	Nenhum	
Suporte LVDTs	Yoke	Nenhum		No topo da viga	Nenhum	

OBS: TC – tensão controlada e DC – deformação controlada

Fonte: (Adaptado Lopes (2016)).

A realização do ensaio ocorre com a aplicação de carregamento constante, até a ruptura do CP prismático, a qual deve ocorrer no L/3 médio do vão, com variação de 5 % (realizar correção no cálculo da tensão de tração). A Equação 5, descreve o cálculo da RTF, dentro do terço médio.

$$RTF = \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (5)$$

Onde:

$RTF$  = Resistência à tração na flexão (MPa);

$F$  =força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

$l$  =é a dimensão do vão entre apoios (mm);

$b$  =é a largura média do corpo de prova (mm);

$d$  =é a altura média do corpo de prova (mm).

#### 2.4.5 Porosidade ( $\eta$ ) e teores de material cimentante ( $Ci\%$ )

Diversos estudos foram realizados para relacionar a porosidade e o teor de material cimentante para o uso em dosagens de misturas de solo e agregados reciclados. A necessidade de um método de dosagem fez com que diversas pesquisas fossem realizadas a fim de se determinar tal relação, entre elas podem ser citadas as realizadas por Foppa (2005), Consoli *et al.* (2007, 2008 e 2011), Cruz (2008), Dalla Rosa (2009), López Junior (2011), Pasche (2016) e Silva (2018) os quais revelaram a dependência na relação entre a quantidade do estabilizador químico e a porosidade da mistura analisada, com agentes cimentantes como a cal, pozolana e o cimento Portland.

Um dos pioneiros na pesquisa da influência existente entre a porosidade e o nível de cimentação foi Larnach (1960) o qual relatou a existência de dependência da resistência de misturas de solo-cimento, considerando a porosidade existente em suas misturas. De acordo com tal autor a compactação não consegue retirar por completo o ar existente nas misturas de solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, desta forma a resistência não pode ser correlacionada com fator água/cimento. Ainda tal relação só pode ser aplicada a materiais onde não há a presença de ar, e os vazios existentes foram preenchidos por água, como no caso de concretos e argamassas.

Para Consoli *et al.* (2007 e 2009) em seus experimentos com solo residual de arenito percebeu o acréscimo de resistência não confinada com o incremento de teores de material cimentante. Ainda, com a redução da porosidade a mistura demonstrou acréscimo de resistência devido a melhor interação entre o solo e o agente cimentante. Tal autor variou experimentalmente as relações de porosidade e teor de cimento, para uma amostra de areia artificialmente cimentada. Desta forma foi verificado que variando os níveis de confinamento, os valores de resistência de ruptura eram muito próximos quando as amostras apresentavam similaridade nas relações porosidade/cimento. Sendo assim através destes experimentos foi constatado que a porosidade, assim como o teor de cimento, define a resistência de pico em solos artificialmente cimentados.

Pasche (2016) e Silva (2018) concordam que existe uma relação unívoca, quanto a quantidade de agente cimentante e a porosidade existente para misturas de diferentes tipos de materiais granulares, ainda que a relação  $\eta/C_{i\%}$  só pode ser avaliada em diferentes traços quando ambas as misturas são preparadas com o mesmo teor de umidade.

Silva (2018) analisou a porosidade ( $\eta$ ) de uma mistura como sendo a definição da razão de vazios (em volume) em relação ao volume total da amostra (V). A Equação 6 foi utilizada em seus experimentos nos quais a porosidade está em função da massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ), do cimento de resistência inicial (C), da quantidade de RAP e do teor de pó de pedra (PP). Sendo cada material (PP, RAP e cimento) possuidor de um peso específico unitário ( $\gamma_{SP}, \gamma_{SRAP}$  e  $\gamma_{SC}$ ), que também deve ser considerado para o cálculo da porosidade.

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ \frac{100-C}{100} \right] \left[ \frac{RAP}{100} \right]}{\gamma_{SRAP}} \right) + \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ \frac{100-C}{100} \right] \left[ \frac{PP}{100} \right]}{\gamma_{SP}} \right) + \left( \frac{\gamma_d V \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{SC}} \right) \right\}}{V} \quad (6)$$

Onde:

$\eta$  = porosidade (%);

$\gamma_d$  = massa específica aparente seca da mistura (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{S_{RAP}}$  = massa específica aparente seca do material fresado (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{S_{PP}}$  = massa específica aparente seca do pó de pedra (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{S_C}$  = massa específica aparente seca do cimento (g/cm<sup>3</sup>);

$V$  = volume do corpo de prova (cm<sup>3</sup>);

$C$  = teor de cimento (%);

$RAP$  = teor de material fresado (%); e

$PP$  = teor de pó de pedra (%).

Para Caputo (1996) a determinação do teor volumétrico de um material participante de uma mistura, ocorre a partir da relação de seu volume com o volume total de tal mistura. Silva (2018) utilizou a Equação 07 para o cálculo do teor volumétrico de cimento (C%) dos corpos de prova utilizados em seus experimentos.

$$C = 100 \frac{V_c}{V} = \frac{\left[ \frac{M_{cp}}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)} \right] \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{sc}} \quad (7)$$

Onde:

$C$  = teor volumétrico de cimento (%);

$V_c$  = volume de cimento (cm<sup>3</sup>);

$V$  = volume do corpo de prova (cm<sup>3</sup>);

$M_{cp}$  = massa do cimento do corpo de prova (g);

$w$  = teor de umidade do corpo de prova (%);

$C$  = teor de cimento (%);

$\gamma_{S_C}$  = massa específica aparente seca do cimento (g/cm<sup>3</sup>).

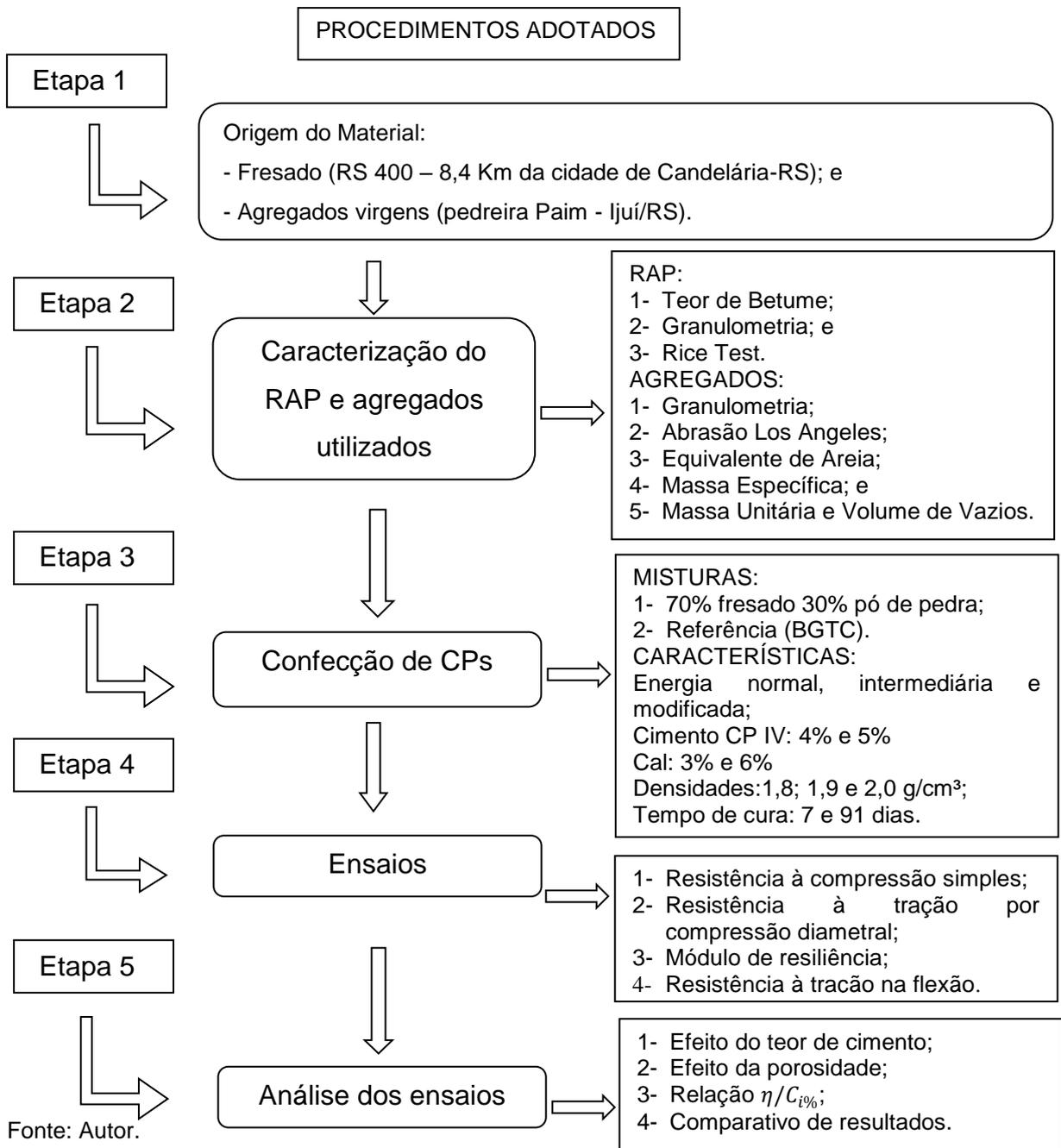
### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão descritas as etapas realizadas para se alcançar os objetivos da pesquisa. Apresentando os percentuais de materiais empregados e os ensaios laboratoriais realizados.

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

De modo a se atingir os objetivos desta pesquisa, ocorreu a divisão da mesma em 5 etapas, conforme descrito no fluxograma da Figura 8.

Figura 7 – Fluxograma da pesquisa



Inicialmente devido a revisão bibliográfica e estudos realizados por outros pesquisadores (MOREIRA, 2006; PASCHE, 2016; SILVA, 2016; SILVA 2018). E ainda devido à falta de material fino no RAP e da necessidade do enquadramento em uma curva granulométrica normatizada, foi determinado a matriz granular de 70% material fresado e 30% pó de pedra. Tendo o material de referência os percentuais de 48,50% pó de pedra, 41% brita 3/8" e 10,50% brita 3/4", tais percentuais se enquadram na curva "C" do DNIT141/2010-ES. A avaliação será realizada em virtude dos percentuais de cal e cimento de cada mistura e suas variações de massa específica aparente seca, propriedades mecânicas e da relação porosidade teor volumétrico de material cimentante  $\eta/C_{i\%}$ .

A pesquisa segue as divisões de variáveis da seguinte maneira:

As variáveis independentes são:

- a) Densidade: expressa pela massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ );
- b) Teor de cimento: massa de cimento dividida pela massa da mistura, expressa em porcentagem;
- c) Teor de cal: massa da cal dividida pela massa da mistura, expressa em porcentagem; e
- d) Teor de umidade: massa de água dividida pela massa da mistura, expresso em porcentagem.

As variáveis fixas são:

- a) Tipos de agregados: brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra de formação basáltica da cidade de Coronel Barros-RS e material fresado asfáltico;
- b) Tipos de agentes cimentantes: cimento CP IV– Pozolânico, nos teores de 4% e 5% e ainda cal hidratada em teores de 3 e 6%;
- c) Tempo de cura: 7 e 91 dias.

As variáveis de resposta são:

- a) Resistência à compressão simples (RCS);
- b) Resistência à tração por compressão diametral (RTCD);
- c) Módulo de resiliência (MR);
- d) Resistência à tração por flexão (RTF);
- e) Relação  $\eta/C_{i\%}$ .

A Tabela 17 descreve os ensaios realizados, com a confecção ou moldagem de 432 corpos de prova. Tendo as quantidades divididas para cada ensaio descritas

em seus respectivos itens. Outro dado apresentado foi a nomenclatura dada a cada mistura, teor de cimento (4 e 5%), cal (3 e 6%) e massa específica aparente seca (d1) 1,8 – (d2) 1,9 - (d3) 2,0 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 17 – Detalhamento e dos Corpos de Prova

Mistura	Ensaio	Cimento (%)	Cal (%)	(g/cm <sup>3</sup> )	Nomenclatura	CPs	Cura (dias)	Total
70% fresado e 30% pó de pedra	RCS, RTF e RTCD-MR	4	3	d1	FP4-3(1,8)	3	7 e 91	108
				d2	FP4-3(1,9)	3	7 e 91	
				d3	FP4-3(2,0)	3	7 e 91	
			6	d1	FP4-6(1,8)	3	7 e 91	
				d2	FP4-6(1,9)	3	7 e 91	
				d3	FP4-6(2,0)	3	7 e 91	
		5	3	d1	FP5-3(1,8)	3	7 e 91	108
				d2	FP5-3(1,9)	3	7 e 91	
				d3	FP5-3 (2,0)	3	7 e 91	
			6	d1	FP5-6(1,8)	3	7 e 91	
				d2	FP5-6(1,9)	3	7 e 91	
				d3	FP5-6(2,0)	3	7 e 91	
Referência	RCS, RTF e RTCD-MR	4	3	d1	REF4-3(1,8)	3	7 e 91	108
				d2	REF4-3(1,9)	3	7 e 91	
				d3	REF4-3(2,0)	3	7 e 91	
			6	d1	REF4-6(1,8)	3	7 e 91	
				d2	REF4-6(1,9)	3	7 e 91	
				d3	REF4-6(2,0)	3	7 e 91	
		5	3	d1	REF5-3(1,8)	3	7 e 91	108
				d2	REF5-3(1,9)	3	7 e 91	
				d3	REF5-3 (2,0)	3	7 e 91	
			6	d1	REF5-6(1,8)	3	7 e 91	
				d2	REF5-6(1,9)	3	7 e 91	
				d3	REF5-6(2,0)	3	7 e 91	

Fonte: (Autor).

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Como pretende-se nesta pesquisa a utilização de materiais existentes no mercado regional, foram usados os materiais encontrados na região de Ijuí-RS, apenas com a utilização do RAP proveniente das proximidades do município de Candelária-RS.

#### 3.2.1 Origem e definição do material fresado asfáltico

O material fresado asfáltico utilizado foi coletado na latitude de -29.61095° e longitude -52.807809°, a cerca de 8,4 Km da cidade de Candelária-RS - ERS 400. A

Figura 9A, demonstra o material fresado e a Figura 9B sua localização geográfica. A armazenagem foi segundo a Figura 10, dentro de sacos plásticos, alojados em baias para materiais utilizados no laboratório de Materiais de Construção Civil (UNIJUI). As caracterizações, a confecção, cura, além de alguns ensaios, ocorreram na cidade de Ijuí-RS, onde mora e trabalha o pesquisador, pois, devido a quantidade de CPs que foram confeccionados, e o cuidado que ocorreu com a cura, se fez necessário a presença do mesmo durante um grande período de tempo. Os demais ensaios e rompimento realizados, ocorreram no laboratório de pavimentação GEPPASV, da UFSM. Ainda para a fresagem foi utilizado uma fresadora do tipo Wirtgen W 100f, com largura de corte 1,0m equipada com um rolo composto por 96 bits. A Figura 11 demonstra a fresadora utilizada. O processo de fresagem aconteceu a frio e a altura do corte foi de 5cm.

Figura 8 – Material fresado utilizado e localização



Fonte: (Autor).

Figura 9 – Armazenamento do material fresado



Fonte: (Autor).

Figura 10 – Fresadora modelo Wirtgen W 100f



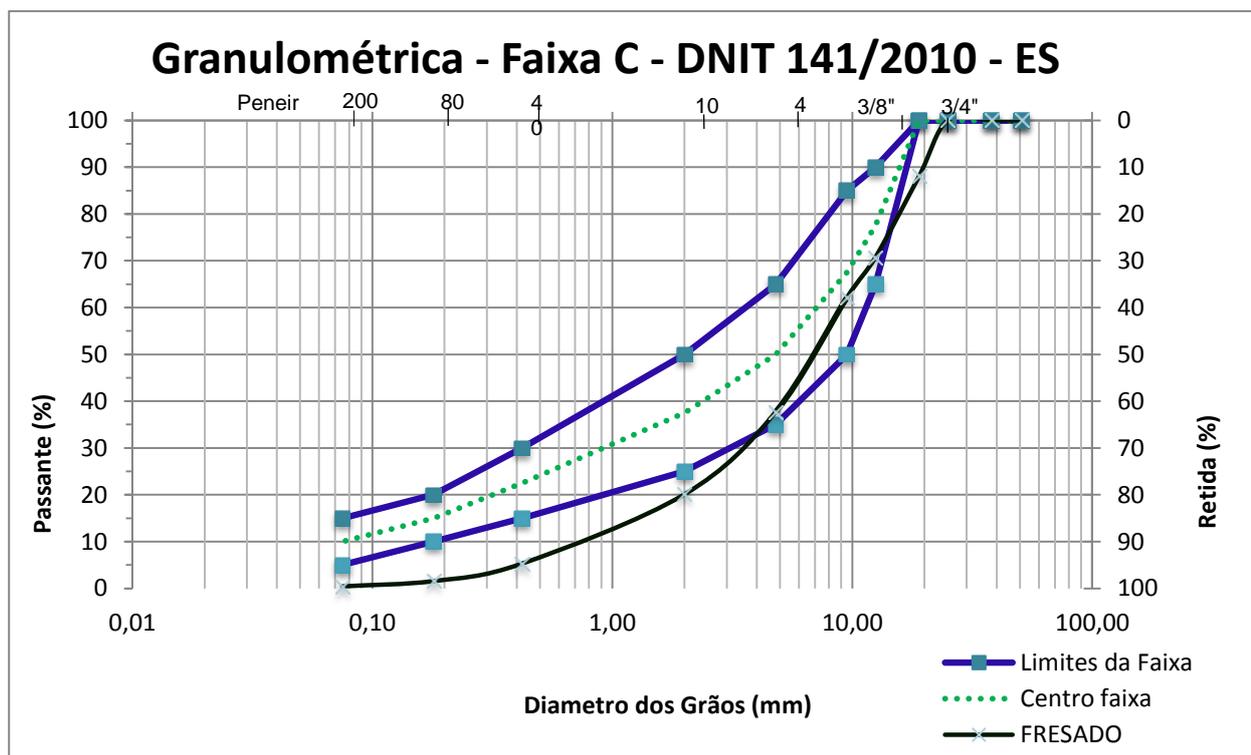
Fonte: (Autor).

O RAP, é proveniente de um revestimento confeccionado originalmente a partir da Faixa C especificação DNIT 031/2006-ES, utilizando ligante asfáltico CAP 50-70. Todas as informações a respeito do RAP mencionadas foram de origem da empresa que estava executando os serviços de recapeamento no local.

Para fins de caracterização do material fresado a ser utilizado nas misturas, foram utilizados ensaios de granulometria e extração de betume, conforme a norma DNER-ME 083/1998. Para se ter parâmetros de análise foram realizados tais ensaios em três amostras. A Figura 12 apresenta a curva granulométrica encontrada do RAP.

Como já mencionado anteriormente pode-se perceber com a curva granulométrica originada do ensaio de granulometria do RAP utilizado nesta pesquisa, que existe falta de material fino (parte inferior da curva), característico do RAP. Devido a falta de material fino, ocorreu o incremento de pó de pedra nas misturas a fim de se ter a estabilização granulométrica. As misturas foram enquadradas na Faixa C do DNIT 141/2010-ES.

Figura 11 – Curva granulométrica do RAP



Fonte: (Autor).

Para se obter o teor de betume do RAP, foi realizado o ensaio no Rotarex elétrico por centrifugação, conforme norma DNER-ME 053/1994. Para tal ensaio foram utilizadas três amostras do material fresado. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos nos ensaios e a Figura 13 o equipamento utilizado e os agregados resultantes após o ensaio.

Tabela 18 – Teor de betume

Amostra	Teor de betume (%)	Média (%)
Amostra 1	5,15	5,09
Amostra 2	4,83	
Amostra 3	5,30	

Fonte: (Autor).

Figura 12 – Imagem de agregados após o ensaio de Rotarex



Fonte: (Autor).

Por fim foi determinada a Massa específica do material segundo a metodologia Rice, denominada densidade máxima medida (DMM), a qual é a razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total de asfalto, a Equação 8, é oriunda da NBR 15619 (2012), a qual normatiza tal ensaio, ainda a Tabela 19 traz as densidades encontradas.

$$DMM = \frac{B}{(A+B-C)} \times 0,99707$$

(8)

Onde:

DMM: densidade máxima medida, expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm<sup>3</sup>);

A: massa da amostra seca ao ar, expressa em gramas (g);

B: massa do recipiente com volume completo com água, expresso em gramas (g);

C: massa do recipiente, da amostra submersa em água, expressa em gramas (g);

Nota: 0,99707 refere-se à densidade da água a 25°C (g/cm<sup>3</sup>).

Tabela 19 – Densidade teórica encontradas

Amostra	A (g)	B (g)	C (g)	DMM (g/cm <sup>3</sup> )	DMM Médio (g/cm <sup>3</sup> )
1	7663,30	1183,60	8381,90	2,54	2,54
2	7673,30	1185,52	8393,50	2,54	

Fonte: (Autor).

### 3.2.2 Caracterização dos agregados

Para a construção civil o termo agregado é um material de origem mineral, normalmente em grãos como o cascalho, areais naturais, pedra britada, etc. Esses agregados podem ser artificiais ou naturais. A NBR 9935/2005, descreve agregado como sendo um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. Dividindo-os em agregado miúdo, os passantes na peneira 4,75 mm, e grãos os passantes em malha 75 mm e retidos na peneira 4,75 mm.

Para esta pesquisa os materiais utilizados são oriundos de processo de britagem, e fornecidos por empresas de produção da região sendo a mesma a Pedreira PAIM, localizada no Município de Coronel Barros-RS.

Devido à falta de material fino na composição do material fresado, foi utilizado como agregado fino pó de pedra, para enquadramento dentro da faixa escolhida nas especificações.

Para a mistura de referência, foi realizada a verificação granulométrica conforme a DNER 083-1998. A Figura 14 demonstra o ensaio de equivalência de areia realizado no material, já a Tabela 20 traz os valores encontrados, com o material passante nas peneiras 3/4" e 3/8" e adição de pó de pedra e ainda a Tabela 21, as verificações laboratoriais dos agregados utilizados.

Tabela 20 – Resultado da média das granulometrias dos agregados

Peneiras		Porcentagem Passante Média		
ASTM	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
2"	50,80	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	38,10	100,00	100,0	100,00
1"	25,40	100,00	100,0	100,00
3/4"	19,10	100,00	100,0	100,00
1/2"	12,70	23,45	100,0	100,00
3/8"	9,50	1,85	98,55	100,00

nº 4	4,80	0,19	17,88	100,00	Fonte: (Autor).
nº 10	2,00	0,00	2,95	98,90	
nº 40	0,42	0,00	0,0	61,00	
nº 80	0,18	0,00	0,0	17,90	
nº 200	0,08	0,00	0,0	8,80	

Tabela 21 – Propriedades dos agregados utilizados nas misturas

Propriedade	Método	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 54/1997	-		58,55
Volume de vazios (%)	NBR NM45/2006	46,55	45,65	42,89
Massa unitária (Kg/m <sup>3</sup> )		1375,95	1399,85	1502,08
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 195/1997	-	-	2,701
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM53/2003	2,47	2,43	-
Absorção (%)		2,98	3,08	-
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 35/1998	14%		-

Fonte: (Autor).

Figura 13 – Ensaio de equivalência de areia



Fonte: (Autor).

### 3.2.3 Materiais cimentícios

De acordo com a NBR 5736/1991, o cimento Portland CP IV – Pozolânico, utilizado como material estabilizador é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura de clínquer e materiais pozolânicos, e sua composição é composta de silicatos de cálcio e de ferro, sulfato de cálcio, material carbonático e pozolana.

Para esta pesquisa foi utilizado cimento CP IV-32, que tem em sua composição de 15% a 50% de material pozolânico. Por isso, proporciona

estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. Possui baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. É pouco poroso, sendo resistente à ação da água do mar e de esgotos (Classe de resistência: 25 a 32 MPa).

O cimento Portland CP IV – Pozolânico tem como finalidade realizar a estabilização química das misturas, utilizando diferentes teores para verificação da influência do parâmetro porosidade/teor de cimento/cal.

Ainda a cal empregada no presente trabalho foi a cal hidratada dolomítica do tipo CH II, comercialmente chamada de “Primor Extra”, seguindo recomendações de pesquisas de solos-cal e concretos-cal.

Por fim a água utilizada para o início das reações químicas é oriunda da rede hidráulica do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ) que é considerada potável. Salvo determinados ensaios em que se fez necessário a utilização de água destilada.

### 3.3 METODOLOGIA PARA DOSAGEM E ENSAIOS REALIZADOS

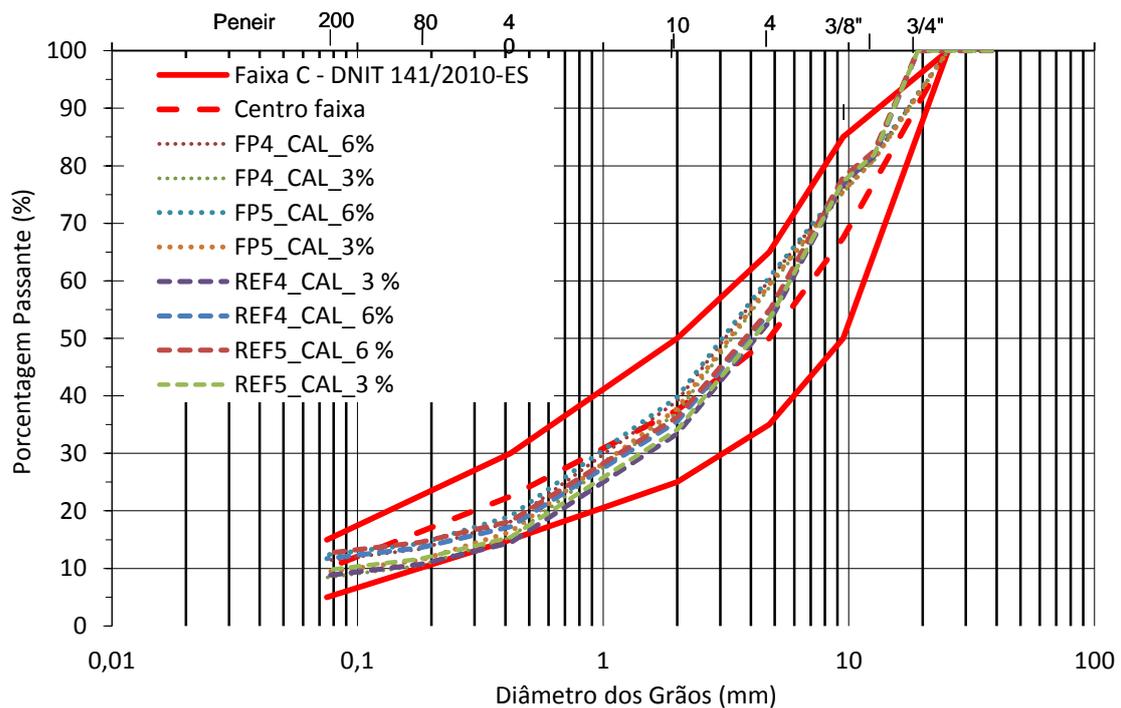
#### 3.3.1 Misturas e Dosagem

No decorrer desta pesquisa pode-se verificar a deficiência de elementos finos na constituição do material fresado alvo de aplicação desta análise. Para a formação do esqueleto mineral ou travamento das partículas existentes na mistura foi utilizado pó de pedra para sanar tal deficiência. A Faixa de enquadramento utilizada para base granular foi a Faixa “C” – DNIT 141/2010-ES, sugerida também pela DNIT-ES 167/13.

De acordo com Moreira (2006), Pasche (2016) e Silva (2018) os quais utilizaram o RAP em suas pesquisas, tem-se a recomendação da utilização de 70% fresado e 30% de pó de pedra para misturas utilizadas em pesquisas para aplicação do material fresado em base de pavimentos flexíveis. Ainda o material fresado utilizado nas misturas foi o passante na peneira 3/4" (19,1 mm), visto que as dimensões dos corpos de prova permitem agregados com diâmetro máximo de 20 mm (NBR 5738, 2002).

Para se ter parâmetros de referência (REF), foi realizado a substituição do material fresado por material virgem. Os percentuais adotados foram 48,50% pó de pedra, 41% brita 3/8" e 10,50% brita 3/4", os quais se aproximaram dos percentuais contidos do material fresado com adição de pó de pedra. Para efeitos de aceitabilidade buscou-se a maior aproximação possível entre a granulometria com o RAP e a mistura de referência (percentuais o mais próximo possível), desta forma minimizando a influência da granulometria nos resultados obtidos. A curva granulométrica das misturas utilizadas está representada na Figura 15, as variações nas malhas finas são referentes aos percentuais de cimento Portland e Cal adicionados nas misturas. Essas variações foram consideradas irrelevantes, visto que todas as misturas se encontram dentro da faixa de trabalho.

Figura 14 – Curva granulométrica das misturas



Fonte: (Autor).

### 3.3.2 Ensaio de compactação Proctor

Os procedimentos usualmente adotados por pesquisadores em relação a compactação dos CPs empregam a mesma energia de compactação preconizado

pelo protocolo de Proctor, energia normal, intermediário e modificado (PCA, 2010). O Manual de Pavimentação DNIT (2006), descreve que a energia de compactação é caracterizada pela aplicação de uma energia mecânica (impacto ou vibração – pressão exercida), em um solo ou agregado. Em consequência da aplicação de tal energia, há o aumento da massa específica aparente e redução dos vazios do material. Desta forma ocorre o incremento de resistência ao cisalhamento e redução da permeabilidade e compressibilidade.

De acordo com a norma DNIT – 164/2013-ME, nos experimentos foram utilizadas as energias normal, intermediária e modificada, a Tabela 22, traz o número de golpes por camada, num total de 5 camadas, para cada tipo de energia. Tais variações são devido a necessidade de variação da densidade para a verificação do fator porosidade e teores de material cimentante. Foi utilizado ainda a massa específica aparente máxima de cada energia.

Tabela 22 – Número de golpes segundo orientações da DNIT 164/13

	Energia de Compactação		
	<i>Normal</i>	<i>Intermediária</i>	<i>Modificada</i>
Número de Golpes por Camada	12	26	55

Fonte: (Adaptado DNIT, 2013).

Para Austroads (2002) deve-se realizar o ensaio de compactação de 70% fresado e 30% pó de pedra, afim de ter parâmetros para as demais misturas. As adições de cimento Portland e Cal incorporadas não alteram de maneira significativa o peso específico.

Para a determinação da massa específica aparente úmida, usou-se a Equação 9, já para a determinação da massa específica aparente seca foi empregada a Equação 10. A determinação da úmida ocorreu após 24 horas de secagem em estufa a 110 °C ± 5 °C, com a Equação 11.

$$\gamma_h = \frac{P'_h}{V} \quad (9)$$

Onde:

$\gamma_h$  = massa específica aparente úmida, em g/cm<sup>3</sup>;

$P'_h$  = peso úmido compactado, em g;

$V$  = volume compactado, em cm<sup>3</sup>.

$$\gamma_d = \gamma_h \times \frac{100}{100 + h} \quad (10)$$

Onde:

$\gamma_d$  = massa específica aparente seca (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_h$  = massa específica aparente úmida (g/cm<sup>3</sup>);

$h$  = teor de material em percentual.

$$h = 100 \times \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \quad (11)$$

$h$  = teor de umidade, em porcentagem;

$P_h$  = peso da amostra úmida;

$P_s$  = peso da amostra seca (110 °C ± 5 °C), até constância de peso.

A Figura 16 demonstra a mistura de fresado e pó de pedra, pronta para o início do ensaio de compactação. Ainda a Figura 17A, demonstra a pesagem de cilindros e a Figura 17B a pesagem de uma amostra seca.

Figura 15 – Mistura de fresado e pó-de-pedra



Fonte: (Autor).

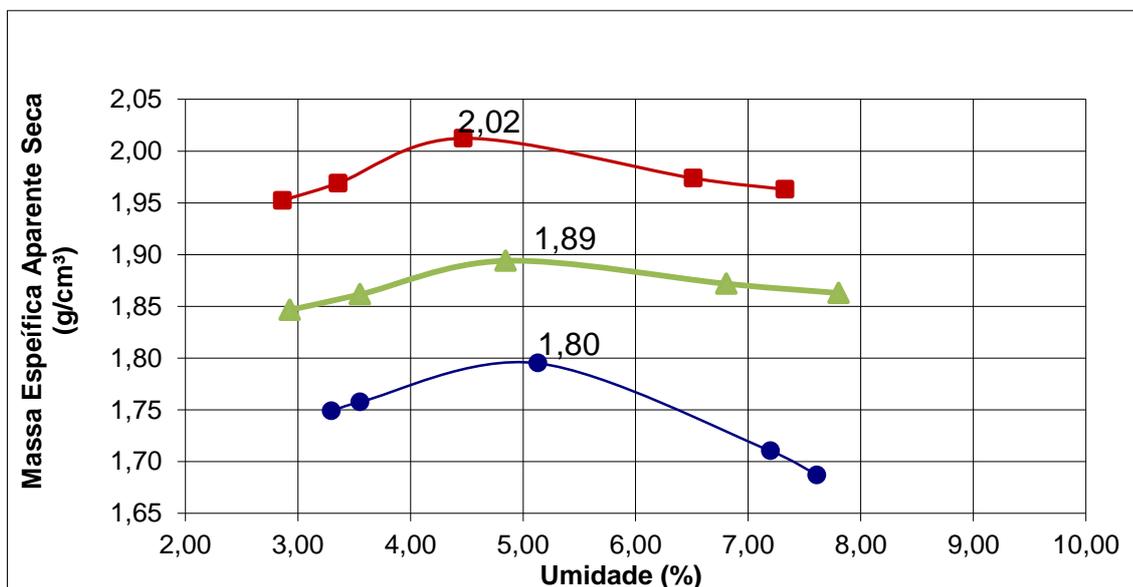
Figura 16 – (A) pesagem amostra úmida e (B) Pesagem de amostra seca (estufa);



Fonte: (Autor).

A Figura 18, traz as curvas de compactação do ensaio de Proctor, fornecendo os valores de  $\gamma_d$  e umidade, das misturas analisadas, para cada energia de compactação.

Figura 17 – Curvas de compactação Proctor



Densidade de 1,8g/cm<sup>3</sup>

▲ Densidade de 1,9g/cm<sup>3</sup>

■ Densidade de 2,0g/cm<sup>3</sup>

Fonte: (Autor).

Sendo a umidade um dos fatores mais importantes no controle de misturas cimentadas devido à resistência e rigidez. Ainda devido a parâmetros comparativos das misturas, foi escolhido o valor de 5% de umidade já que o mesmo é a média das

umidades ótimas de todas as energias de compactação (normal, intermediária e modificada), desta forma obtendo o  $\gamma_d$  de 1,8g/cm<sup>3</sup>, 1,9g/cm<sup>3</sup> e 2,0g/cm<sup>3</sup>, utilizados nesta pesquisa.

### **3.3.3 Moldagem, cura e aceitação dos corpos de prova**

Após a caracterização de todos os parâmetros necessários, se deu início a moldagem dos corpos de prova. Cilíndricos (RCS, RTCD e MR) e Prismáticos para RTF. Com as seguintes especificações e tamanhos:

- a) resistência à tração na flexão: 100 x 100 x 400 mm;
- b) resistência à tração por compressão diametral e MR: 100 x 61 mm;
- c) resistência à compressão simples: 100 x 200 mm;

Para moldagem dos CPs foi observado o que prescreve a NBR 5738/15, para concretos. Antes de se iniciar a preparação das amostras era verificada a umidade hidrocópica do material a ser empregado (fresado e pétreos) presente naturalmente devido a estocagem e ao ar. Desta forma, de posse da umidade do material calculava-se a quantidade de água necessária para se atingir o percentual de 5% definido para a umidade ótima, conforme o ensaio de compactação.

Para facilitar a melhor mistura dos materiais envolvidos, foi utilizado uma betoneira de capacidade de mistura de 70 litros, na qual ocorria a mistura dos materiais envolvidos sendo primeiramente adicionado o material granular, em consequência era adicionado o teor de cimento/cal e pôr fim a adição de água calculada. A mistura ocorria até que se atingisse uma homogeneidade entre os materiais.

Logo após a mistura de todos os componentes, era utilizado um pano úmido sobre a “boca” do tambor, assim evitando a perda de umidade da mistura para o ambiente ou a entrada acidental de outros materiais. Para cada moldagem de novos CPs era religada a Betoneira para o material ser misturado. Deste modo mantendo as características originais da mistura.

A compactação ocorreu através de energia dinâmica, sendo composta de 2 camadas para Resistência a Compressão Simples, 1 camada para Resistência a Tração por Compressão Diametral e MR os quais serão utilizados os mesmos CPs em ambos os ensaios. Ainda para a Resistência a Tração na Flexão foi utilizado uma camada de material. A determinação da quantidade de material empregado por

camada foi calculada segundo a densidade específica para cada traço (1,8; 1,9 e 2,1 g/cm<sup>3</sup>) e do volume do CP. Para se ter melhor união entre as camadas era realizado uma escarificação entre as camadas, a fim de promover melhor aderência entre as mesmas.

A determinação da umidade dos CPs confeccionados, foi controlada através de amostragem, as quais eram retiradas do material de confecção que originou o corpo de prova (sobras), em número igual a dois por CPs. A média do teor de umidade dos mesmos foi considerada o teor de umidade do CP. As Figuras 19A, 19B e 19C demonstram os moldes dos CPs envolvidos para a RTF, RCS, e ainda RTCD e MR, respectivamente.

Figura 18 – Moldes utilizados: A) ensaio RTF; B) ensaio RCS e C) ensaio RTCD/MR



Fonte: (Autor).

Os corpos de prova foram mantidos dentro dos moldes em câmara úmida durante um período de 48 horas (iniciais). Para desta forma se evitar a desagregação no estágio inicial de cura. Decorrido o tempo de cura se iniciava a verificação dos seguintes quesitos:

- Identificação do CP;
- Medição da altura, diâmetro (cilíndrico) ou largura (retangular), em três medições distintas, com aproximação de 0,1mm;
- Pesagem do CP, com aproximação de 0,1g; e

- Após aceitação era levado o CP, novamente a câmara úmida para o término de cura de 7 dias e 91 dias. A Figura 20 demonstra os CPs durante a cura úmida e a Figura 21, os CPs antes da realização do capeamento (ensaio de RCS).

Figura 19 – Cura dos CPS



Fonte: (Autor).

Figura 20 – Desmoldagem e verificações de aceitação de CPs



Fonte: (Autor).

Fedrigo (2015) utilizou para os ensaios de RCS e RTCD, os percentuais de aceitação igual a  $\pm 0,5\%$  para a umidade ótima e de  $\pm 0,2 \text{ kN/m}^3$  para o peso específico aparente seco  $\gamma_d$ , para fins de aceitação de seus CPs.

Silva (2018) utilizou como parâmetros de aceitação a Massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ), com grau de compactação entre 98,5% a 101,5%, sendo o grau de compactação definido como o valor de  $\gamma_d$  efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de  $\gamma_d$  definido como meta. Para o teor de umidade foi estabelecido variação de  $\pm 0,5$  percentual. Nesta pesquisa foram adotados os valores sugeridos por Silva (2018), devido à similaridade dos experimentos.

### **3.3.4 Ensaio de Resistência à compressão simples (RCS)**

Após decorrido o tempo de cura de 7 e 91 dias em câmara úmida, um dia antes da realização do ensaio de RCS, os CPs eram submetidos a saturação em tanque com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação.

O rompimento dos CPs foi realizado com prensa hidráulica da marca EMIC número de série 599/644, calibrada na escala de 10kN pela Instruqual, a qual aplica esforço de compressão até a ruptura dos corpos de prova. A Figura 22, mostra a prensa antes do início do ensaio e durante o ensaio.

Figura 21 – Prensa hidráulica utilizada para a RCS



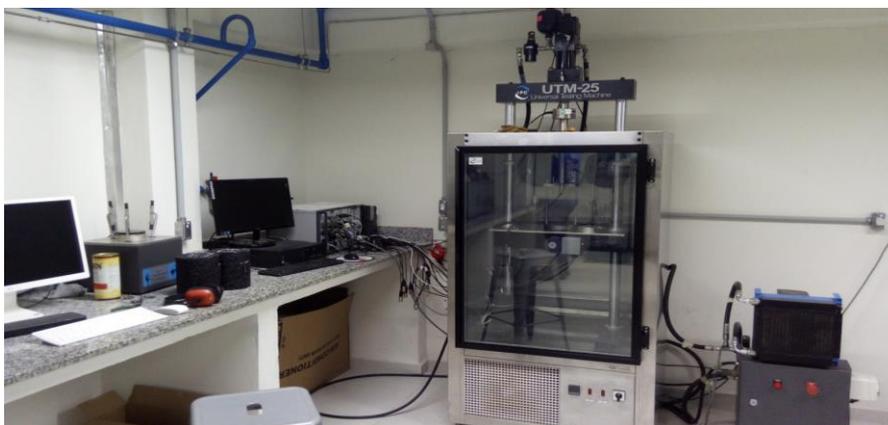
Fonte: (Autor).

### 3.3.5 Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

Para a realização de tal ensaio foi utilizada uma prensa com taxa de deformação vertical controlada de 0,8mm/s, a qual permite a verificação da medida do deslocamento vertical e da carga em função do tempo.

A obtenção dos valores de RTCD, dos CPs ensaiados foram gerados pela Equação 3 e a Figura 23 apresenta a Prensa utilizada. A Figura 24 demonstra os CPs após saída da câmara úmida e a Figura 25 um CP pronto para realização do ensaio.

Figura 22 – Prensa UTM-25 para RTCD



Fonte: (Autor).

Figura 23 – Desmoldagem de CPs para RTCD e MR e conferencia de aceitação



Fonte: (Autor).

Figura 24 – CP durante ensaio de RTCD



Fonte: (Autor).

### 3.3.6 Ensaio de Módulo de resiliência (MR)

Para o ensaio de Módulo de Resiliência foi utilizado uma prensa hidráulica modelo Universal Test Machine – UTM 25 da IPC Global, a qual possui um acoplamento de um regulador de tempo e frequência a um pistão central (Figura 26), ainda, tal equipamento pode realizar o ensaio sobre temperaturas e frequências de carregamentos diversas. O ensaio foi realizado segundo a normativa DNIT-ME 134/2010.

Figura 25 – Ensaio de Módulo de Resiliência



Fonte: (Autor).

O ensaio de MR foi realizado após a cura úmida dos CPs. Para se ter a temperatura desejada os mesmos foram armazenados por um período mínimo de 12 horas a temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . O valor obtido foi a média entre os resultados alcançados da mesma amostra (2 ensaios da mesma amostra).

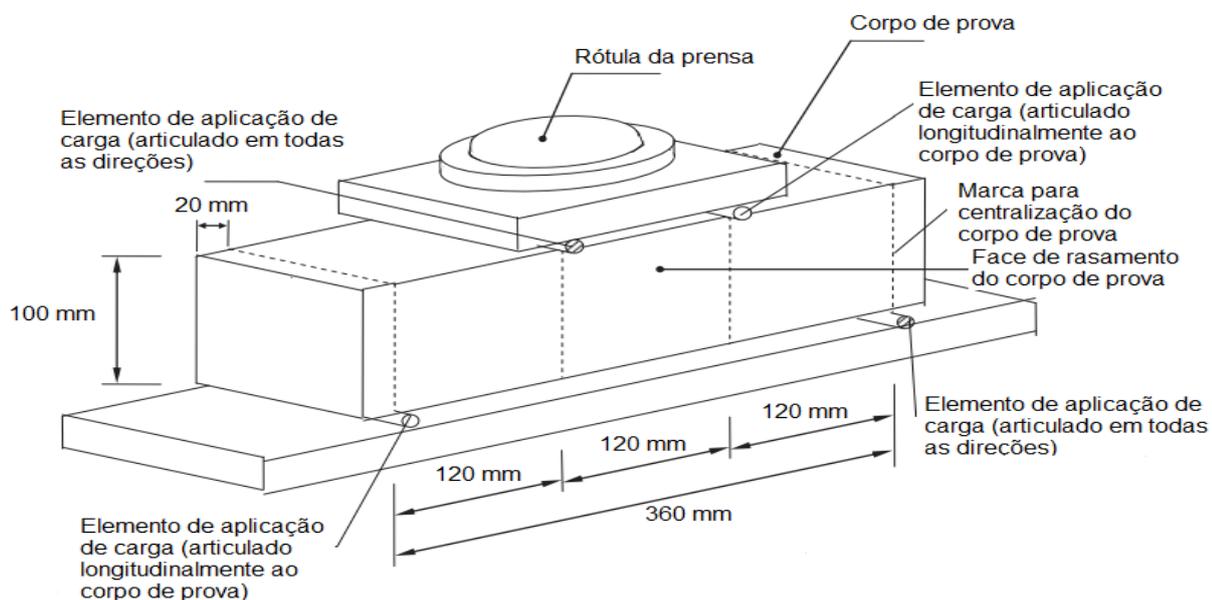
O ensaio de Módulo de Resiliência ocorre a temperatura pré-determinada, aplicando-se uma carga repetitiva (frequência constante) de compressão no plano diametral. O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,20 seguindo as recomendações de Trichês e Santos (2011).

As medidas de deslocamento foram realizadas por LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*), os quais determinam o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal (nas duas faces do corpo de prova), por meio de aplicação de carga que gera tensão de tração transversal ao plano de aplicação da mesma. Neste ensaio foi aplicada carga a uma frequência de 60 ciclos por minuto, com tempo de aplicação de carga de 0,10 segundo, desta forma tendo 0,90 segundos de repouso ou descarregamento.

### 3.3.7 Resistência à tração na flexão (RTF)

O ensaio ocorreu após decorrido o tempo de cura estipulado seguindo as orientações da NBR 12142/2010, com o rompimento de vigotas com dimensões  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ , através de uma presa hidráulica do tipo Amsler (mesma utilizada no ensaio de RCS). A Figura 27 demonstra a posição dos apoios da vigota e modo de execução do ensaio de RTF.

Figura 26 – Configuração para ensaio RTF



Fonte: (Adaptado de Cervo, 2004).

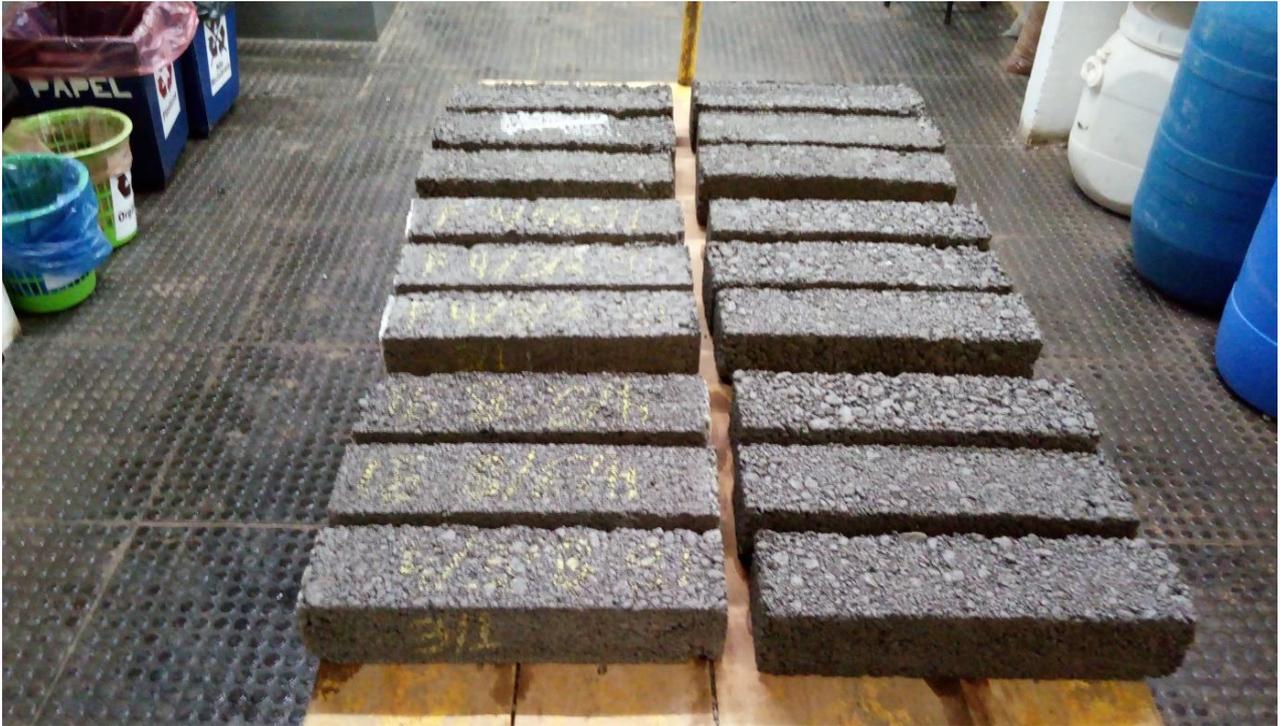
A Figura 28 mostra a armazenagem na câmara úmida dos CPs de RTF, já a Figura 29 os CPs antes do ensaio e a Figura 30 os CPs após o ensaio de RTF, com rompimento dentro do terço médio da vigota.

Figura 27 – Cura de CPs do ensaio de RTF



Fonte: (Autor).

Figura 28 – CPs de RTF antes do rompimento



Fonte: (Autor)

Figura 29 – Rompimento de CPs do ensaio de RTF



Fonte: (Autor).

### 3.3.8 Porosidade e teores de material cimentante

Para a determinação da porosidade ( $\eta$ ), e do teor volumétricos de material cimentante ( $Ci_{\%}$ ) foram utilizadas as Equações 12 e 14, respectivamente, para o material fresado mais adição de pó de pedra. Ainda para correlacionar a porosidade com o teor volumétrico de material cimentante, foram confeccionados corpos de

prova com diferentes percentuais de cimento e cal para diferentes densidades a partir de uma mesma umidade.

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} - \frac{Cal}{100} \right] \left[ \frac{RAP}{100} \right]}{\gamma_{SRAP}} \right) + \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} - \frac{Cal}{100} \right] \left[ \frac{PP}{100} \right]}{\gamma_{SPP}} \right) + \left( \frac{\gamma_d V \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{SC}} \right) + \left( \frac{\gamma_d V \left[ \frac{Cal}{100} \right]}{\gamma_{SCal}} \right) \right\}}{V} \quad (12)$$

Onde:

$\eta$  = porosidade (%);

$\gamma_d$  = massa específica aparente seca da mistura (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{SRAP}$  = massa específica aparente seca do material fresado (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{SPP}$  = massa específica aparente seca do pó de pedra (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{SC}$  = massa específica aparente seca do cimento (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_{SCal}$  = massa específica aparente seca da cal (g/cm<sup>3</sup>);

$V$  = volume do corpo de prova (cm<sup>3</sup>);

$C$  = teor de cimento (%);

$Cal$  = teor de cal (%);

$RAP$  = teor de material fresado (%); e

$PP$  = teor de pó de pedra (%).

A determinação da porosidade para as misturas de Referência, foi realizada conforme a Equação 13, sendo a mesma constituída de *BRITA 3/4"*, *BRITA 3/8"*, Pó de Pedra e material cimentante (cimento CP-IV e Cal Hidratada). Ainda cada material possui sua massa específica aparente seca.

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} - \frac{Cal}{100} \right] \left[ \frac{BRITA\ 3/4''}{100} \right]}{\gamma_{SBRITA\ 3/4''}} \right) + \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} - \frac{Cal}{100} \right] \left[ \frac{BRITA\ 3/8''}{100} \right]}{\gamma_{SBRITA\ 3/8''}} \right) + \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} - \frac{Cal}{100} \right] \left[ \frac{PP}{100} \right]}{\gamma_{SPP}} \right) + \left( \frac{\gamma_d V \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{SC}} \right) + \left( \frac{\gamma_d V \left[ \frac{Cal}{100} \right]}{\gamma_{SCal}} \right) \right\}}{V} \quad (13)$$

Para a determinação do teor volumétrico do material cimentante (Cimento e cal) foi utilizado a Equação 14 elaborada a partir de estudos realizados por Silva (2018).

$$Ci\% = 100 \frac{V_c}{V} = \frac{\left( \frac{\left[ \frac{M_{cp}}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)} \right] \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{sc}} + \frac{\left[ \frac{M_{cal}}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)} \right] \left[ \frac{Cal}{100} \right]}{\gamma_{scal}} \right)}{V} \quad (14)$$

Onde:

$Ci\%$  = teor volumétrico de material cimentante (%);

$C$  = teor de cimento (%);

$Cal$  = teor de cal (%);

$V_c$  = volume de cimento ( $\text{cm}^3$ );

$V_{cal}$  = volume de cal ( $\text{cm}^3$ );

$V$  = volume do corpo de prova ( $\text{cm}^3$ );

$M_{cp}$  = massa do cimento do corpo de prova (g);

$M_{cal}$  = massa da cal do corpo de prova (g);

$w$  = teor de umidade do corpo de prova (%);

$\gamma_{sc}$  = massa específica aparente seca do cimento ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$\gamma_{scal}$  = massa específica aparente seca da cal ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

#### 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E AVALIAÇÕES

Neste capítulo estão sendo apresentados os resultados alcançados nos ensaios realizados conforme consta no Capítulo 2 e 3. Ainda são discutidos e avaliados os resultados encontrados na pesquisa. Os teores de cimento Portland CP IV utilizados nos ensaios foram de 4% e 5%, juntamente com teores de 3% e 6% da cal, ambos com a substituição em massa seca dos agregados, para uma massa específica aparente seca de 1,8; 1,9; e 2,0 g/cm<sup>3</sup> com um tempo de cura em câmara úmida de 7 e 91 dias, utilizando a umidade em percentual de  $\omega = 5\%$ . As comparações foram realizadas correlacionando as resistências e rigidez de cada mistura ao grau de compactação utilizado, teor de material cimentante, porosidade( $\eta$ ) e porosidade/teor de material cimentante( $\eta/C_{i\%}$ ).

Para melhor entendimento dos resultados são apresentados gráficos com os valores encontrados nos ensaios realizados. Os pontos apresentados nas análises dos resultados correspondem a média de três corpos de prova moldados com as mesmas características.

##### 4.1 RELAÇÃO ENTRE O TEOR DE MATERIAL CIMENTANTE E RESISTÊNCIA

São apresentadas nas Figuras 31 a 38, os valores encontrados nos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral e modulo de resiliência, em relação as densidades adotadas, para os traços elaborados. Todos em função das densidades adotadas, para cada mistura utilizada nos experimentos. Cada ponto existente foi baseado na média de três corpos de prova moldados com o mesmo material e mesmas condições ambientes. A Tabela 23 traz os valores de resistência a compressão simples encontrados, já as Figuras 31 e 32 demonstram as curvas formadas pela RCS em relação a densidade das misturas analisadas.

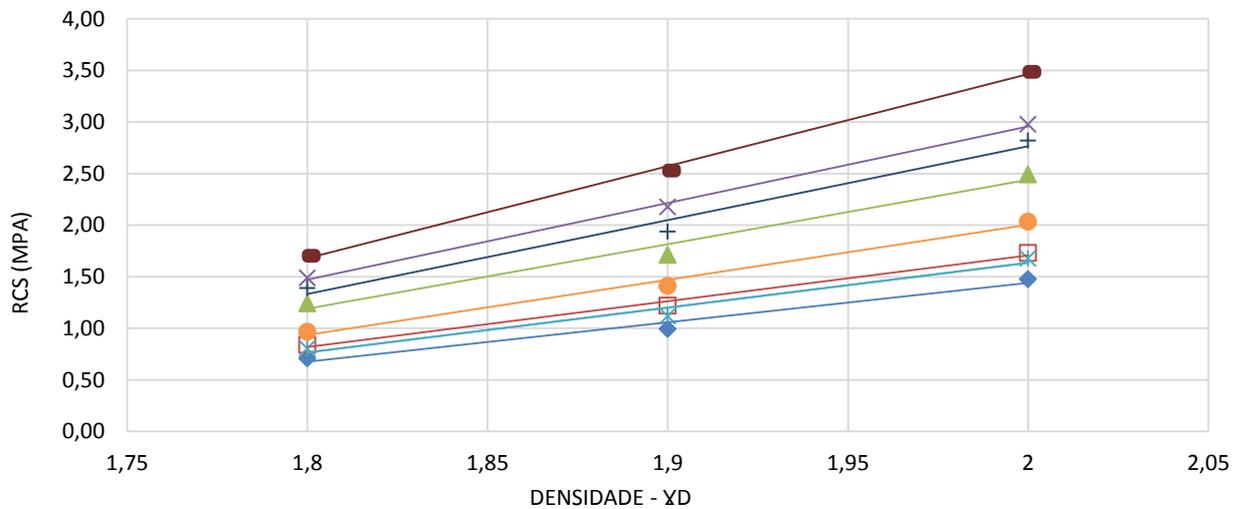
Tabela 23 – Valor médio de Resistência à Compressão Simples

Traço		Densidade g/cm <sup>3</sup>	RCS - 7 dias de cura (MPa)		RCS - 91 dias de cura (MPa)		Desvio Padrão 7 dias (MPa)		Coeficiente de variação 7 dias (%)		Desvio Padrão 91 dias (MPa)		Coeficiente de variação 91 dias (%)	
			REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP
4,0	3,0	1,80	0,88	0,70	1,49	1,26	0,05	0,03	5,65%	4,23%	0,11	0,03	8,00%	2,38%
		1,90	1,17	0,97	2,39	2,08	0,01	0,04	1,20%	4,03%	0,19	0,03	8,21%	1,44%
		2,00	1,73	1,45	3,66	3,34	0,03	0,10	1,83%	6,78%	0,29	0,05	8,11%	1,49%
4,0	6,0	1,80	0,99	0,82	1,67	1,44	0,02	0,02	2,33%	2,38%	0,15	0,04	9,11%	2,78%
		1,90	1,43	1,20	2,69	2,34	0,04	0,02	3,02%	1,64%	0,23	0,03	8,74%	1,28%

	2,00	2,06	1,70	3,83	3,45	0,07	0,07	3,25%	4,05%	0,20	0,07	5,31%	2,02%	
5,0	3,0	1,80	1,42	1,28	2,09	1,79	0,06	0,09	4,16%	7,25%	0,03	0,06	1,44%	3,29%
		1,90	1,97	1,68	2,98	2,70	0,06	0,11	2,99%	6,61%	0,05	0,13	1,83%	4,76%
		2,00	2,82	2,49	4,33	3,92	0,01	0,05	0,46%	2,04%	0,18	0,05	4,05%	1,28%
5,0	6,0	1,80	1,70	1,49	2,38	2,11	0,04	0,02	2,40%	1,17%	0,03	0,02	1,27%	0,95%
		1,90	2,53	2,17	3,52	3,14	0,05	0,07	2,10%	3,41%	0,02	0,20	0,61%	6,36%
		2,00	3,48	2,98	4,92	4,41	0,19	0,07	5,39%	2,28%	0,01	0,19	0,27%	4,31%

Fonte: Autor

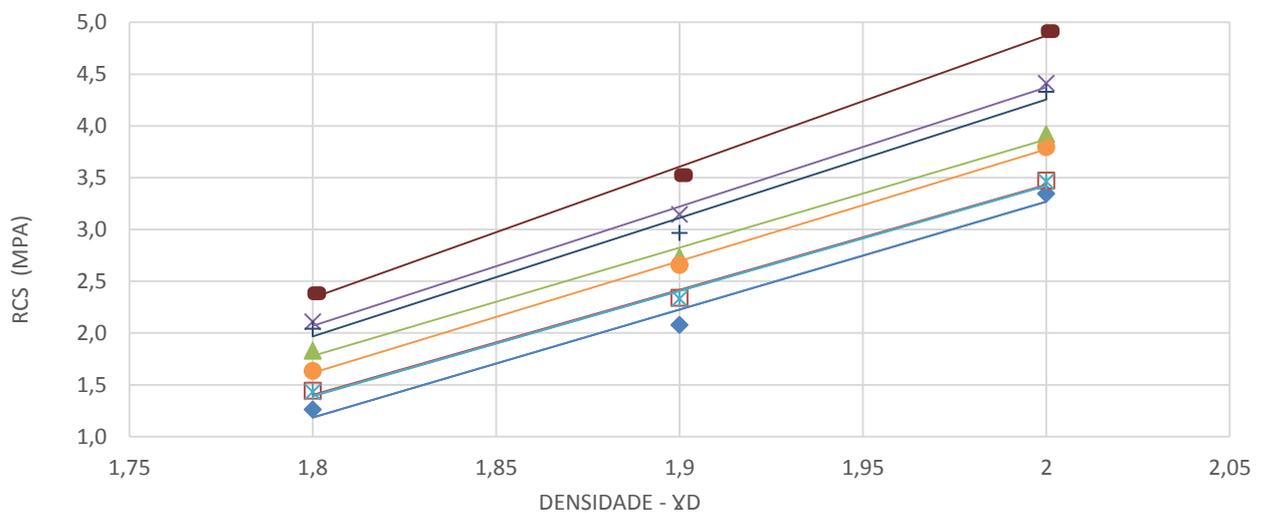
Figura 30 – Valores de Resistência a Compressão Simples aos 7 dias de cura



- ◆ FP4-3 RCS=3,826(γd)-6,210 (R<sup>2</sup> = 0,97)
- ◻ FP4-6 RCS=4,450(γd)-7,193 (R<sup>2</sup> = 0,99)
- ▲ FP5-3 RCS=6,250(γd)-10,062(R<sup>2</sup> = 0,98)
- × FP5-6 RCS=7,436(γd)-11,916(R<sup>2</sup> = 0,99)
- ✱ REF4-3 RCS = 4,359(γd)-7,081 (R<sup>2</sup> = 0,97)
- REF4-6 RCS = 5,336(γd)-8,667 (R<sup>2</sup> = 0,99)
- + REF5-3 RCS = 7,153(γd)-11,542 (R<sup>2</sup> = 0,98)
- REF5-6 RCS =8,916(γd)-14,369 (R<sup>2</sup> = 1,00)

Fonte: Autor

Figura 31 – Valores de Resistência a Compressão Simples aos 91 dias de cura



- ◆ FP4-3 RCS=10,400(γd)-17,600(R<sup>2</sup> = 1,00)
- ◻ FP4-6 RCS=10,200(γd)-16,900(R<sup>2</sup> = 1,00)
- ▲ FP5-3 RCS=10,200(γd)-16,900(R<sup>2</sup> = 1,00)
- × FP5-6 RCS=10,200(γd)-16,900(R<sup>2</sup> = 1,00)
- ✱ REF4-3 RCS = 10,150(γd)-16,878 (R<sup>2</sup> = 0,99)
- REF4-6 RCS = 10,800(γd)-17,800 (R<sup>2</sup> = 1,00)
- + REF5-3 RCS = 10,800(γd)-17,800 (R<sup>2</sup> = 1,00)
- REF5-6 RCS = 10,800(γd)-17,800 (R<sup>2</sup> = 1,00)

$$FP5-3 \text{ RCS} = 10,455(\gamma d) - 17,040 (R^2 = 0,99)$$

$$FP5-6 \text{ RCS} = 11,518(\gamma d) - 18,663 (R^2 = 0,99)$$

$$REF5-3 \text{ RCS} = 11,400(\gamma d) - 18,600 (R^2 = 1,00)$$

$$REF5-6 \text{ RCS} = 12,700(\gamma d) - 20,400 (R^2 = 1,00)$$

Fonte: Autor

Analisado as Figuras 31 e 32, é perceptível que mesmo em pequenos teores o material cimentante adquire ganho de resistência à compressão simples, tanto pela presença do cimento como pela participação da cal, para um período de cura igual a 7 dias, considerado curto, quando no usado do cimento CP IV, com características de resistência para períodos mais longos. O percentual de 4% de cimento com a adição de 3% e 6% de cal (FP4-3 entre FP4-6), obteve ganho de resistência de 16,19%, apenas com a variação de 3% da cal na mistura (mesmo percentual de cimento 4%, variando a cal em 3%). Já para o teor de 5% de cimento com variação da cal em 3%, o ganho foi de 18,11% (FP5-3 para FP5-6), mostrando assim que a cal participa no aumento de RCS nas misturas analisadas.

Quando comparado a variação do percentual de cimento, dentro do mesmo teor de cal (FP4-3 e FP5-3), o ganho foi de 41,85%, e de 43,19% para FP4-6 e FP5-6. Ainda quando comparado os teores de FP4-6 (4% cimento e 6% cal) com o teor de FP5-3 (5% cimento e 3% de cal) o ganho de resistência foi de 30,60%, demonstrando novamente que a cal participa do acréscimo de ganho de resistência. Pois, para a RCS, dentro do mesmo percentual de cal o valor de ganho foi de entorno de 41,85% e de 43,19%. Quando ocorre a mudança no percentual da cal, ocorre o aumento de resistência. Ainda quando verificado o ganho de resistência apenas entre o teor de cimento (FP4-3 e FP5-3), desconsiderando o ganho devido a presença da cal foi de entorno de 25,66%, e de 25,08% para FP4-6 e FP5-6 (variação do percentual de cimento em 1% e mantido o percentual da cal). Os valores encontrados para a variação entre os percentuais de cimento, mantendo o valor constante de adição da cal, são semelhantes aos encontrados por Silva (2018) de 24,5% quando ocorre a adição de cimento em percentual de 1% (pesquisador utilizou cimento CP V sem adições). Assim demonstrando que mesmo com a mudança do tipo de cimento e a adição da cal na mistura, o comportamento físico e químico das misturas são muito semelhantes.

Na avaliação para o período de cura aos 91 dias, com o teor de cimento de 4% e variando a cal de 3% e 6%, o ganho foi de 9,12% (FP4-3 e FP4-6). Quando ocorre a mudança do percentual de cimento para 5%, o acréscimo de RCS é de 12,58% (FP5-3 e FP5-6). Para o mesmo teor de cal e variando a quantidade de

cimento (FP4-3 e FP5-3) os resultados foram de 23,17%, e de 26,18% (FP4-6 e FP5-6).

O ganho de resistência dentro do mesmo percentual de cimento se deve a reações químico-física ocorrida na hidratação do cimento pozolânico, devido a presença da cal, a qual provem o hidróxido de cálcio das reações pozolânicas e ainda restabelecer a reserva alcalina, Hoppe (2008). Tal reação, provoca o ganho de resistência ao liberar a água em período mais longo e lento.

Para analisar os valores encontrados de resistência a tração na flexão, foi elaborado a Tabela 24 a qual traz os valores médios de resistência obtidos para o material fresado (FP) e material de referência (REF), já as Figuras 33 e 34, demonstram as curvas formadas nas misturas confeccionadas, em relação a densidade adotada na mistura.

Tabela 24 – Valor médio de resistência a tração na flexão

Traço		Densidade g/cm <sup>3</sup>	RTF 7 dias de cura (MPa)		RTF 91 dias de cura (MPa)		Desvio Padrão 7 dias (MPa)		Coeficiente de variação (%)		Desvio Padrão 91 dias (MPa)		Coeficiente de variação (%)	
			REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP
4,0	3,0	1,80	0,14	0,11	0,40	0,32	0,014	0,013	9,97%	10,45%	0,016	0,014	3,86%	4,08%
		1,90	0,21	0,16	0,64	0,53	0,013	0,012	6,42%	7,20%	0,018	0,016	2,95%	2,93%
		2,00	0,24	0,18	0,96	0,79	0,005	0,005	2,11%	2,53%	0,012	0,011	1,29%	1,32%
4,0	6,0	1,80	0,17	0,14	0,52	0,43	0,013	0,012	8,11%	8,70%	0,017	0,015	3,36%	3,40%
		1,90	0,22	0,17	0,80	0,67	0,010	0,009	4,90%	5,34%	0,015	0,013	1,88%	1,91%
		2,00	0,26	0,20	1,15	0,96	0,013	0,012	5,64%	5,88%	0,013	0,012	1,16%	1,19%
5,0	3,0	1,80	0,18	0,15	0,69	0,54	0,012	0,011	6,67%	7,56%	0,019	0,021	2,80%	3,69%
		1,90	0,21	0,18	0,99	0,85	0,013	0,012	7,02%	6,89%	0,005	0,005	0,54%	0,55%
		2,00	0,27	0,22	1,28	1,11	0,013	0,012	5,14%	5,35%	0,016	0,014	1,26%	1,26%
5,0	6,0	1,80	0,20	0,16	0,82	0,70	0,005	0,005	2,65%	2,83%	0,098	0,090	12,06%	12,82%
		1,90	0,25	0,20	1,09	0,91	0,010	0,009	4,39%	4,79%	0,098	0,017	9,08%	1,84%
		2,00	0,29	0,24	1,40	1,25	0,009	0,008	3,12%	3,27%	0,019	0,017	1,33%	1,33%

Fonte: Autor

Figura 32 – Valores de Resistência a Tração na Flexão aos 7 dias de cura

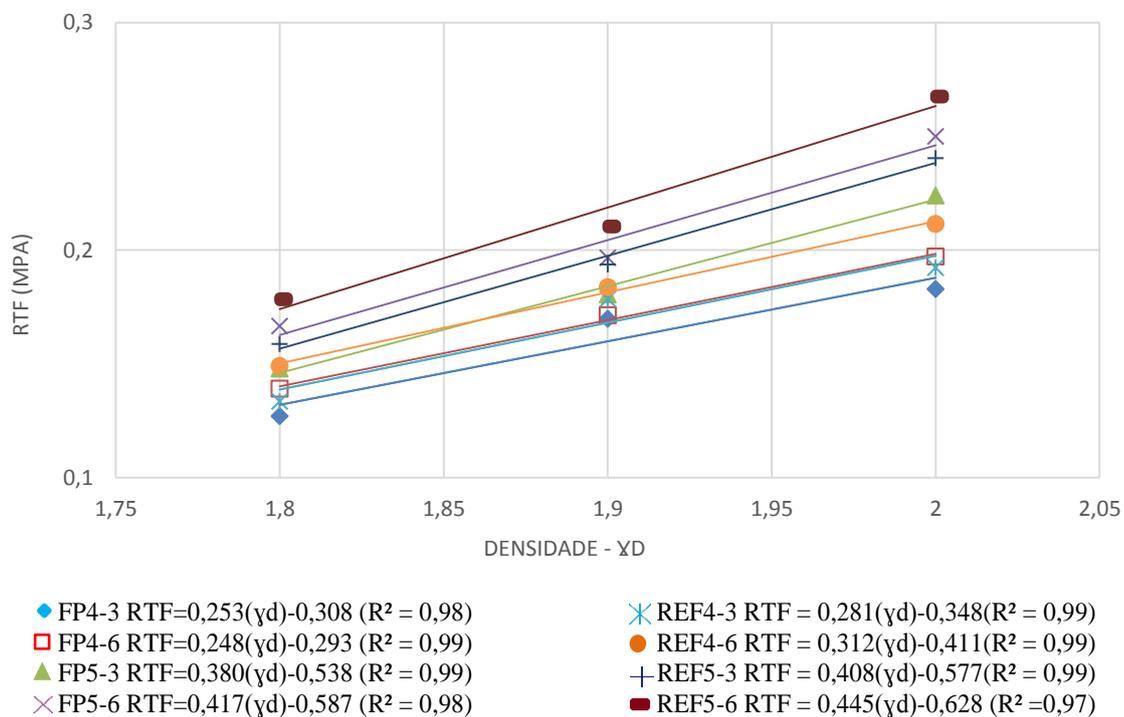
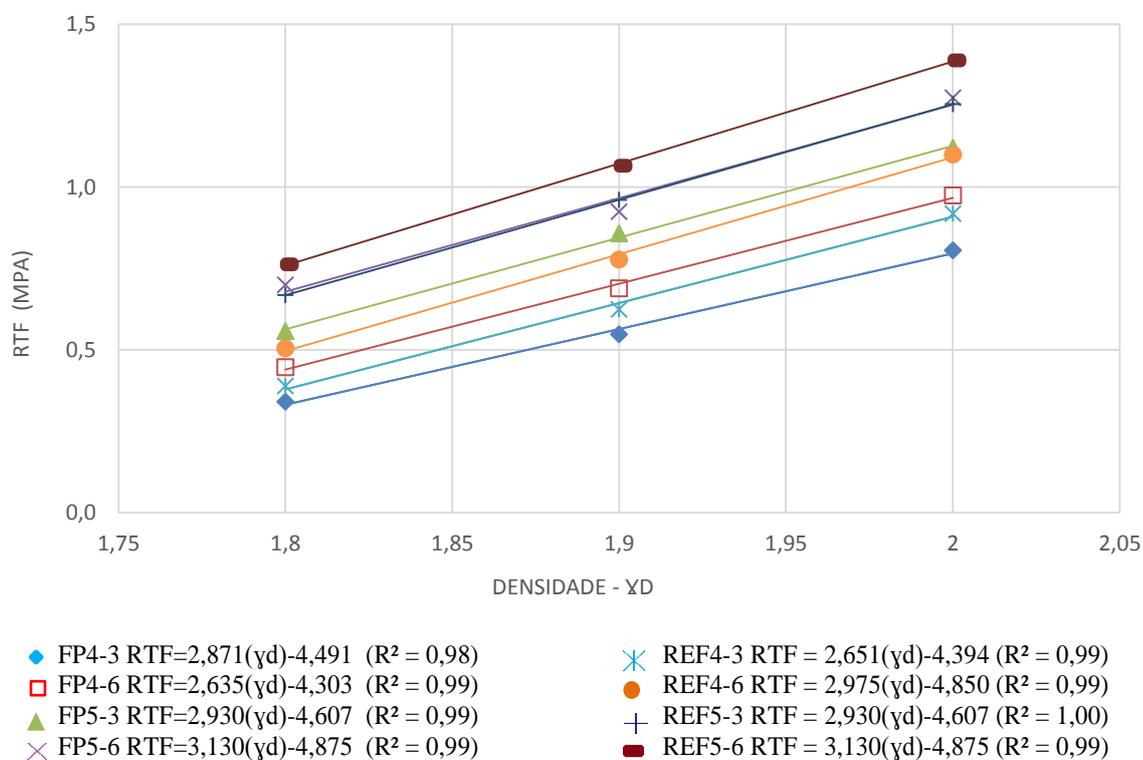


Figura 33 – Valores de resistência a tração na flexão aos 91 dias de cura



A partir da análise das Figuras 33 e 34, para os períodos de cura de 7 e 91 dias, iniciando-se pelo primeiro período, para os valores em percentual da cal entre

3% e 6% (FP4-3 e FP4-6) com teor de cimento de 4%, o ganho de resistência foi de 5,6%, e de 9,96% para os percentuais de FP5-3 e FP5-6. Ainda, quando comparados os percentuais de cimento utilizados, FP4-3 e FP5-3 (variação do teor de cimento para mesmo percentual de cal) o ganho foi de 12,79%, e para FP4-6 e FP5-6 o valor foi de 16,85%. Para o período mais longo de cura, os valores de resistência apresentam melhores resultados quando comparados aos valores encontrados aos 7 dias, tal diferença se deve as características do cimento CP IV. O ganho de resistência dentro dos períodos de cura de 7 e 91 dias, foi de 69,61% para o teor de FP4-3 (variação da resistência aos 7 dias aos valores encontrados para o período de 91 dias), já para FP4-6 de 74,56%, quando da mudança de percentual de cimento para os mesmos períodos de cura se tem para FP5-3 e FP5-6 os valores foram de 77,45% e 78,40%. Desta forma demonstrado que o ganho de resistência ocorre durante um período de cura mais longo, e que ao decorrer da vida útil do pavimento o mesmo está adquirindo resistência.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral apresentaram valores coerentes quando comparados aos tempos de cura de 7 e 91 dias, devido ao uso do cimento CP IV, o acréscimo de resistência aos 91 dias foi de 60,90% para o traço 4% cimento e 3% cal (RF4-3), e para os demais traços de RF4-6; RF5-3 e RF5-6 foram de 61,94%, 64,85% e 65,22% respectivamente, levando em consideração os valores de resistência encontrados aos 7 dias de cura.

Em média o módulo de resiliência apresentou valores de crescimento de cerca de 32,95% em relação a cura de 7 para 91 dias, os quais podem ser verificados na Tabela 26. Tal fato sugere um crescimento linear, observado também por Silva (2018), na utilização do cimento Portland CP V para densidades de 1,9; 2,0 e 2,1 g/cm<sup>3</sup>.

Ainda outro fato de suma importância foi a variação da resistência em relação ao grau de compactação, fato este descrito por Pasche (2016). Exemplo disso é RF4-3 (2,0g/cm<sup>3</sup>), quando comparado a RF5-6 (1,8g/cm<sup>3</sup>) para ambos os tempos de cura (7 e 91 dias), o menor teor de material cimentante produziu melhores resultados de resistência e módulo. Assim demonstrando que o material cimentante depende do grau de compactação para o ganho de resistência. Sendo assim um arranjo granulométrico juntamente com compactação correta é de fundamental importância para a diminuição da porosidade e ganho de resistência.

Os resultados alcançados possuem um baixo desvio padrão. Ainda as misturas quando comparadas entre o período de cura de 7 dias com o período de 91 dias, apresentaram uma variação de 59,17% da resistência inicial. Tal variação segundo a NBR 6118 deve ser de 63%, quando comparado o ganho de resistência dos 7 dias aos 28 dias, para o uso do cimento CP IV em concretos. A Tabela 25 traz os valores médios de RTCD e a Tabela 26 os valores médios de MR.

Tabela 25 – Valor médio de resistência à tração por compressão diametral

Traço		Densidade g/cm <sup>3</sup>	RTCD - 7 dias de cura (MPa)		RTCD - 91 dias de cura (MPa)		Desvio Padrão 7 dias (MPa)		Coeficiente de variação 7 dias (%)		Desvio Padrão 91 dias (MPa)		Coeficiente de variação 91 dias (%)	
CIMENTO	CAL		REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP
4,0	3,0	1,80	0,12	0,09	0,28	0,20	0,008	0,008	7,42%	10,21%	0,009	0,005	3,63%	2,53%
		1,90	0,18	0,13	0,45	0,33	0,009	0,004	5,44%	2,78%	0,005	0,009	1,09%	3,07%
		2,00	0,28	0,20	0,70	0,53	0,008	0,008	3,02%	4,30%	0,008	0,021	1,18%	3,93%
4,0	6,0	1,80	0,12	0,10	0,32	0,23	0,005	0,011	3,82%	12,08%	0,008	0,005	2,73%	2,40%
		1,90	0,18	0,15	0,67	0,42	0,005	0,004	2,57%	2,83%	0,024	0,009	3,64%	2,32%
		2,00	0,31	0,23	0,88	0,60	0,005	0,021	1,61%	9,35%	0,024	0,021	2,85%	3,50%
5,0	3,0	1,80	0,15	0,12	0,40	0,31	0,005	0,005	3,47%	4,04%	0,021	0,019	5,09%	6,15%
		1,90	0,24	0,17	0,70	0,51	0,012	0,005	5,35%	2,72%	0,008	0,005	1,22%	0,98%
		2,00	0,34	0,29	1,05	0,82	0,012	0,008	3,94%	2,96%	0,026	0,021	2,59%	2,56%
5,0	6,0	1,80	0,19	0,14	0,49	0,32	0,012	0,005	7,10%	4,37%	0,033	0,008	6,78%	2,40%
		1,90	0,28	0,19	0,82	0,58	0,012	0,008	4,68%	4,20%	0,025	0,008	3,13%	1,46%
		2,00	0,38	0,29	1,10	0,86	0,021	0,008	5,84%	10,21%	0,022	0,021	2,00%	2,56%

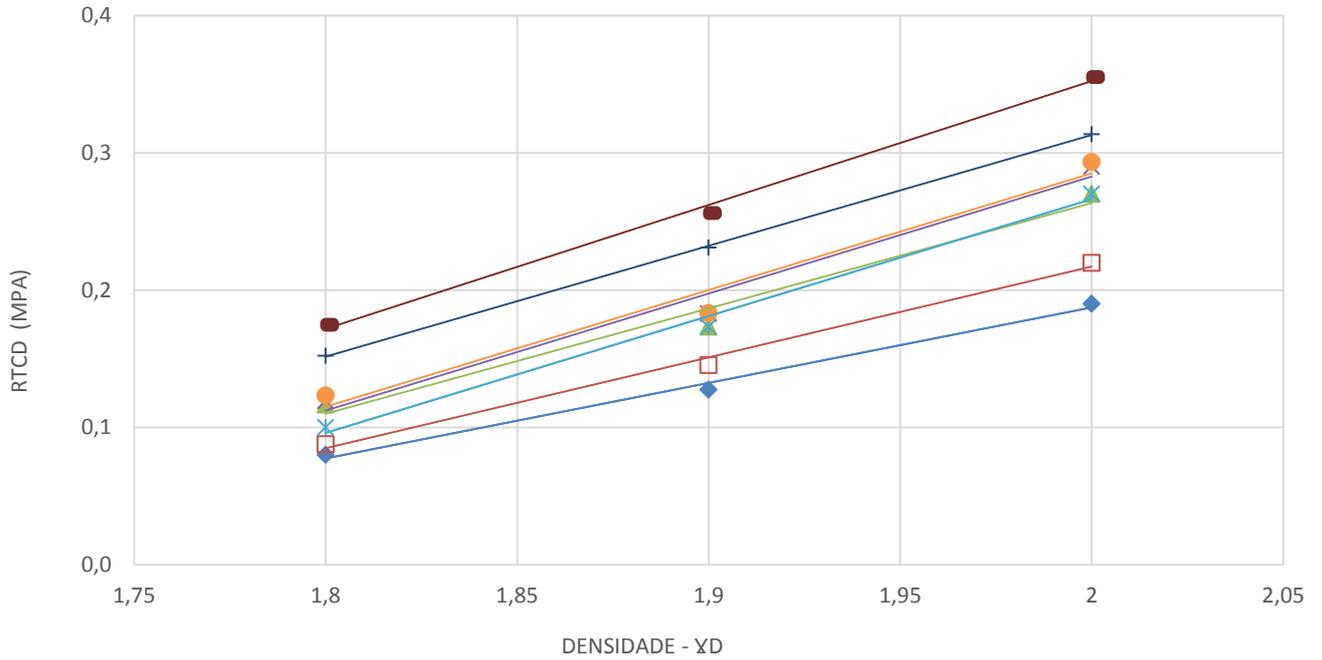
Fonte: Autor

Tabela 26 – Valor médio de módulo de resiliência

Traço		γ <sub>d</sub> g/cm <sup>3</sup>	MR - 7 dias de cura (MPa)		MR - 91 dias de cura (MPa)		Desvio Padrão 7 dias (MPa)		Coeficiente de variação (%)		Desvio Padrão 91 dias (MPa)		Coeficiente de variação (%)	
CIMENTO	CAL		REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP
4,0	3,0	1,80	6588,2	2787,20	9183,3	4840,19	154,2	132,11	2,3%	4,74%	386,4	517,52	4,2%	10,69%
		1,90	9345,6	4287,04	12513,9	7310,72	1295,8	142,52	13,9%	3,32%	544,0	763,53	4,3%	10,44%
		2,00	13170,4	6404,80	15939,5	9295,62	306,9	243,54	2,3%	3,80%	212,1	284,89	1,3%	3,06%
4,0	6,0	1,80	7683,8	3239,78	10505,3	5415,07	1748,2	476,71	22,8%	14,71%	466,8	244,90	4,4%	4,52%
		1,90	11026,2	5219,55	13303,3	7659,30	1281,9	752,30	11,6%	14,41%	719,6	152,14	5,4%	1,99%
		2,00	14124,5	7923,20	18087,3	10435,20	1211,6	555,41	8,6%	7,01%	539,4	555,41	3,0%	5,32%
5,0	3,0	1,80	9825,8	4271,83	12420,9	6541,77	133,6	521,30	1,4%	12,20%	1154,4	550,09	9,3%	8,41%
		1,90	12685,3	6161,34	15540,3	9575,94	2002,2	835,60	15,8%	13,56%	553,9	437,49	3,6%	4,57%
		2,00	15510,0	8874,34	20114,4	12067,47	1440,6	235,30	9,3%	2,65%	1106,0	354,88	5,5%	2,94%
5,0	6,0	1,80	11578,1	4732,17	13725,8	6885,94	203,9	256,83	1,8%	5,43%	296,4	336,48	2,2%	4,89%
		1,90	13721,4	6730,30	16724,4	10199,90	364,6	144,40	2,7%	2,15%	472,7	356,07	2,8%	3,49%
		2,00	16798,4	9795,40	20783,0	12629,93	770,4	251,80	4,6%	2,57%	261,9	235,30	1,3%	1,86%

Fonte: Autor

Figura 34 – Valores de RTCD aos 7 dias de cura em relação às densidades



- ◆ FP4-3 RTCD=0,296(γd)-0,443(R<sup>2</sup> = 0,94)
  - FP4-6 RTCD=0,660(γd)-1,108 (R<sup>2</sup> = 0,97)
  - ▲ FP5-3 RTCD=0,588(γd)-0,924(R<sup>2</sup> = 0,99)
  - × FP5-6 RTCD=0,852(γd)-1,422 (R<sup>2</sup> = 0,97)
  - × REF4-3 RTCD = 0,422(γd)-0,643(R<sup>2</sup> = 0,90)
  - REF4-6 RTCD = 0,882(γd)-1,430(R<sup>2</sup> = 0,97)
  - + REF5-3 RTCD = 0,973(γd)-1,648(R<sup>2</sup> = 0,97)
  - REF5-6 RTCD = 1,187(γd)-1,988(R<sup>2</sup> = 0,99)
- Fonte: Autor

Figura 35 – Valores de RTCD aos 91 dias de cura em relação às densidades

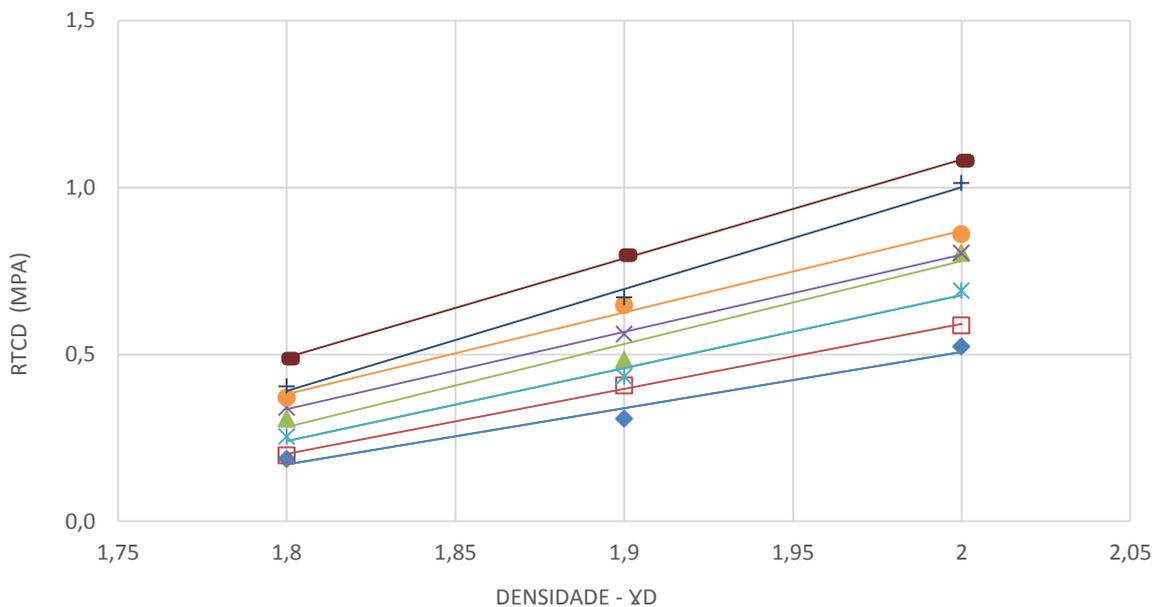




Figura 36 – Valores de MR aos 7 dias de cura em relação às densidades

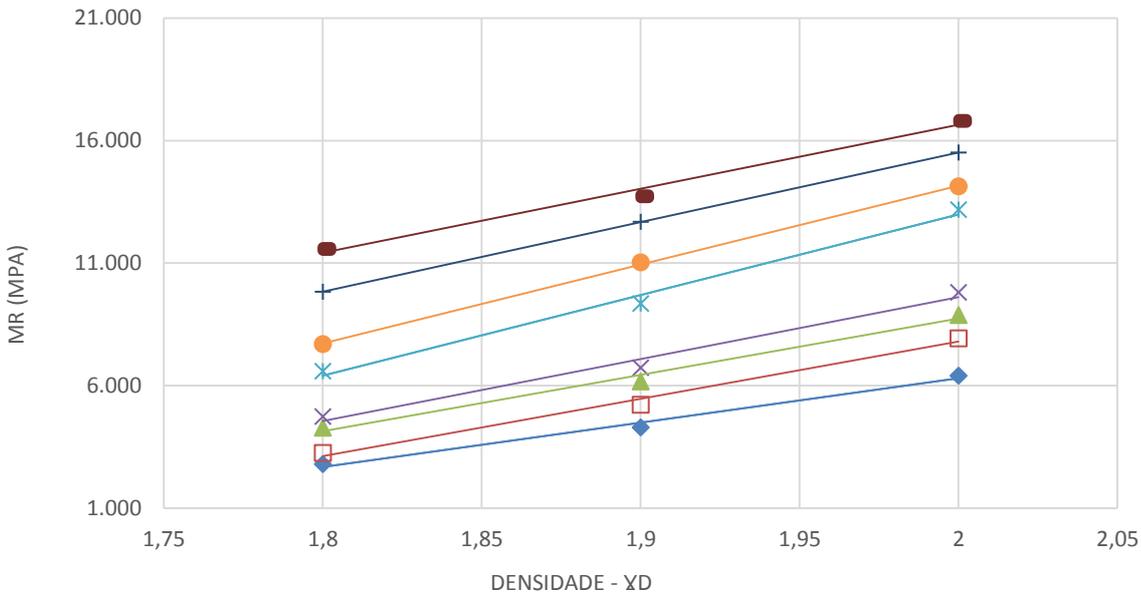
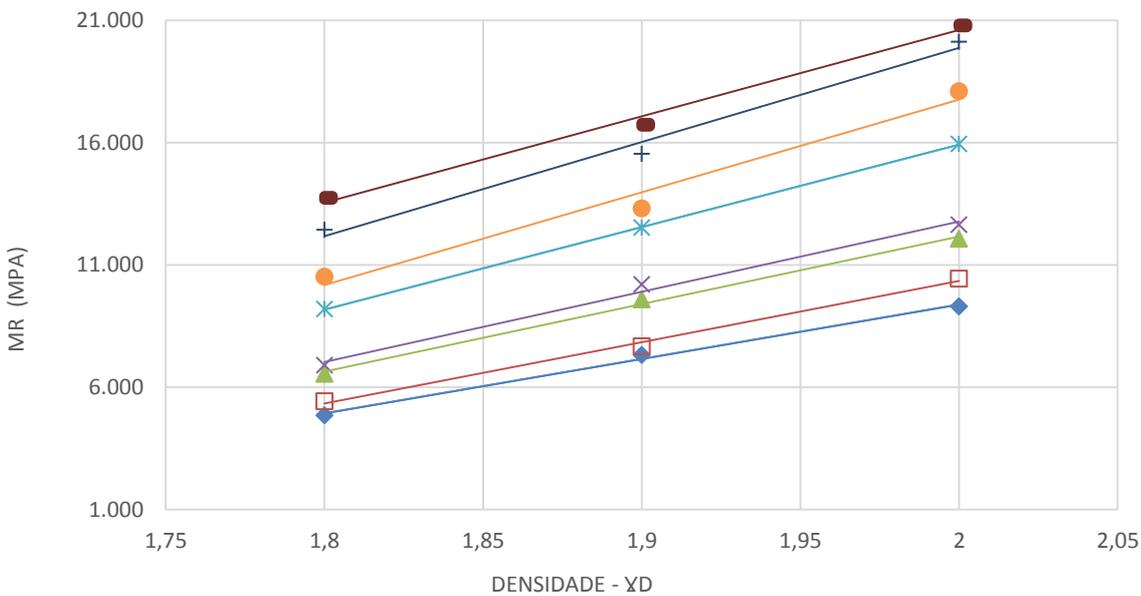


Figura 37 – Valores de MR aos 91 dias de cura em relação às densidades



$$\square \text{ FP4-6MR}=25101(\gamma\text{d})-39855 \quad (R^2 = 0,99)$$

$$\blacktriangle \text{ FP5-3 MR}=27628(\gamma\text{d})-43099 \quad (R^2 = 0,99)$$

$$\times \text{ FP5-6MR}=28720(\gamma\text{d})-44663 \quad (R^2 = 0,99)$$

$$\text{REF4-6 MR} = 37910(\gamma\text{d})-58065 \quad (R^2 = 0,97)$$

$$\text{REF5-3 MR} = 38467(\gamma\text{d})-57063 \quad (R^2 = 0,98)$$

$$\text{REF5-6 MR} = 35286(\gamma\text{d})-49966 \quad (R^2 = 0,99)$$

Fonte: Autor

A análise dos dados alcançados e descritos nas Figuras 31 a 38, tornou perceptível que a adição de cimento e da cal, mesmo que em pequenos teores, produz ganho de resistência e rigidez nas misturas elaboradas. Para cada 1% de acréscimo de cimento ocorreu um aumento médio de 25,37% para o ensaio de resistência à compressão simples. Tal efeito foi verificado por Pasche (2016) e Silva (2018). A presença da cal na mistura proporcionou ainda um ganho de resistência de 16,19% para mistura com 4% de cimento e de 18,11% para mistura com teor de cimento de 5%, apenas com variação da quantidade da cal em 3% (comparativo entre os percentuais de 3% e 6% de cal para o mesmo teor de cimento). Assim fica demonstrado que a mesma participa no ganho de resistência da mistura, para o uso do cimento CP IV, conforme descrito por (HOPPE, 2002). As Figuras 31 a 38 demonstram que o acréscimo de material cimentante provoca um crescimento linear das resistências e dos módulos, tanto para o material fresado quanto para o material de referência.

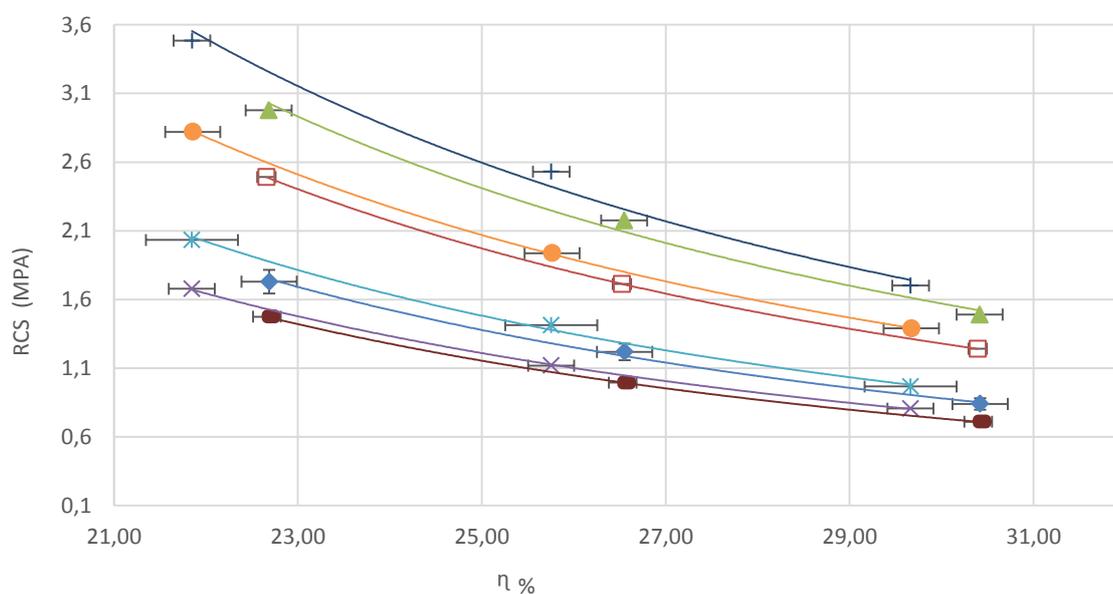
Outra análise refere-se à diferença existente nos resultados de rigidez das misturas com RAP e BGTC. A pequena quantidade de pasta de cimento existente nas misturas não é capaz de envolver por completo grande parte dos grãos do agregado, tornando as ligações entre eles pontuais (SACHET (2011, 2013) e HUANG (2005, 2006)). Outro fato observado foi a diminuição da rigidez devido a presença do ligante asfáltico que envolve os agregados do material fresado, o qual torna mais frágil as ligações cimentantes das misturas com RAP, desta forma verificado melhores resultados com material natural devido a inexistência do ligante.

Ainda os resultados da pesquisa, apresentaram baixo desvio padrão, representado pelas barras de dispersão. E foram em acordo com a NBR 6118:2003, quanto a resistência aos 7 dias de cura para o cimento CP – IV quando comparados aos valores encontrados aos 91 dias. A formação das retas se deve ao ganho de resistência devido ao aumento do grau de compactação das misturas e das adições de material cimentante.

## 4.2 POROSIDADE

As figuras 39 a 46 apresentam as curvas formadas pela variação de resistência e módulo devido à porosidade para os teores de cimento e cal adotados. Os resultados baseiam-se na média de três corpos de prova moldados com o mesmo material e as mesmas condições ambientais.

Figura 38 – Valores de RCS aos 7 dias de cura em relação à porosidade



■ FP4-3  $RCS = 3,52 \times 10^3 (n)^{-2,493}$  ( $R^2=1,00$ )

◆ FP4-6  $RCS = 3,78 \times 10^3 (n)^{-2,460}$  ( $R^2=0,99$ )

□ FP5-3  $RCS = 4,10 \times 10^3 (n)^{-2,374}$  ( $R^2=1,00$ )

▲ FP5-6  $RCS = 4,66 \times 10^3 (n)^{-2,351}$  ( $R^2=0,99$ )

× REF4-3  $RCS = 2,74 \times 10^3 (n)^{-2,400}$  ( $R^2=0,99$ )

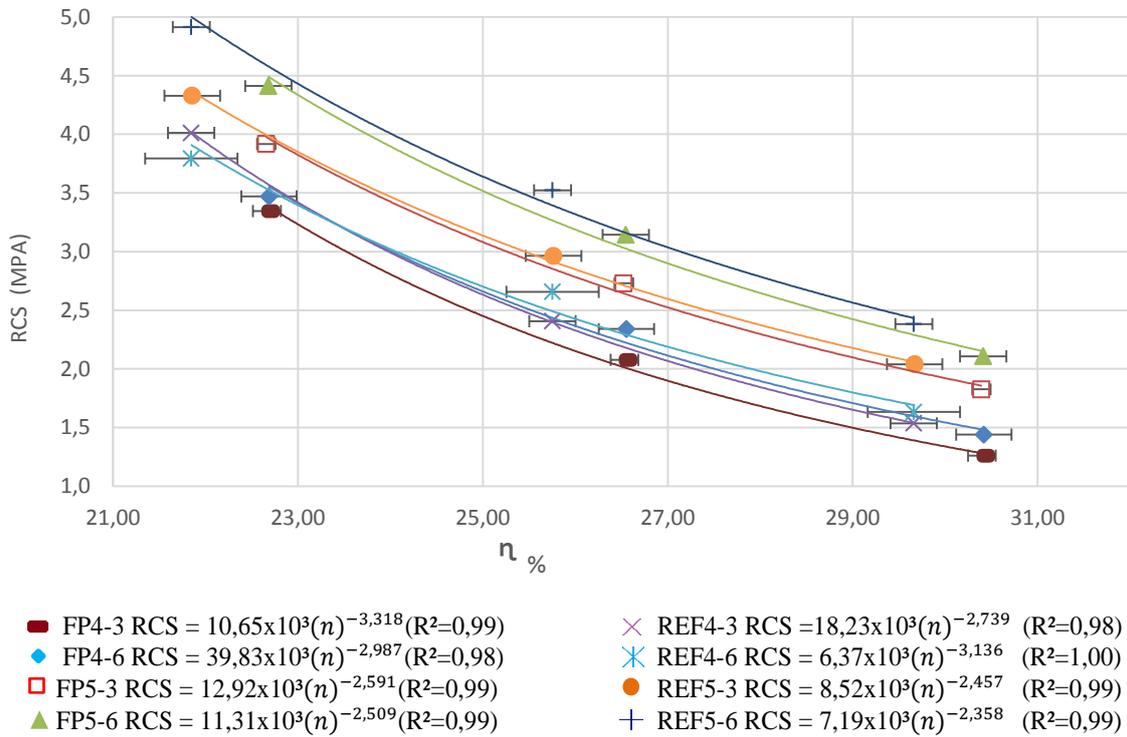
✱ REF4-6  $RCS = 3,66 \times 10^3 (n)^{-2,428}$  ( $R^2=0,99$ )

● REF5-3  $RCS = 3,56 \times 10^3 (n)^{-2,315}$  ( $R^2=1,00$ )

+ REF5-6  $RCS = 4,75 \times 10^3 (n)^{-2,334}$  ( $R^2=0,98$ )

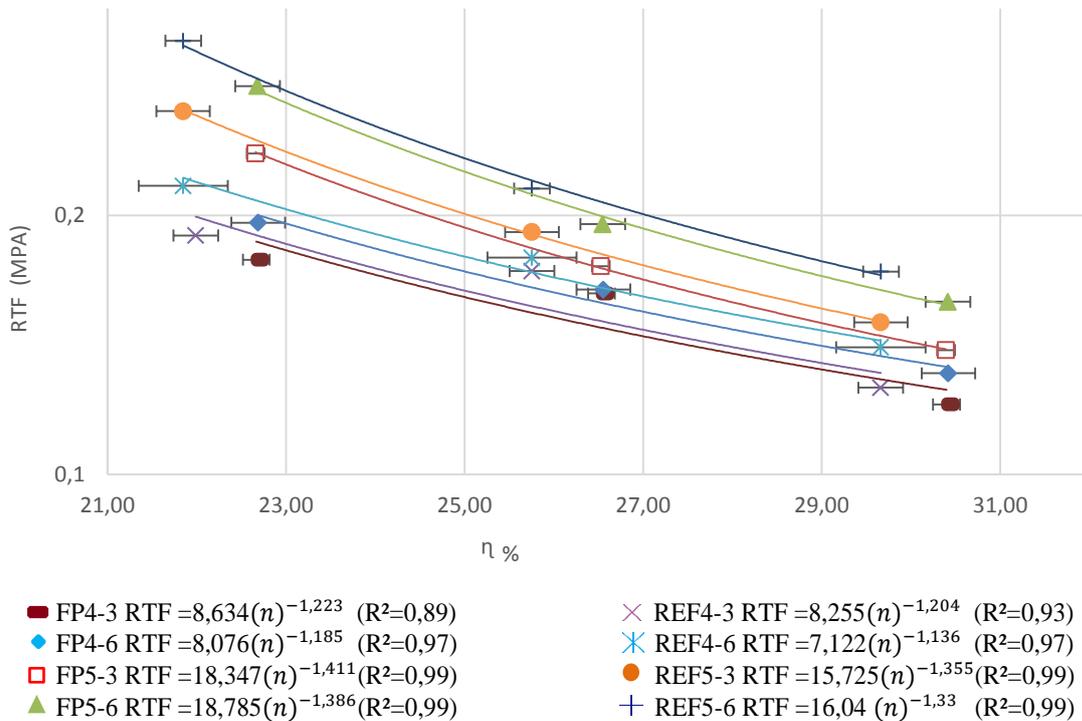
Fonte: Autor

Figura 39 – Valores de RCS aos 91 dias de cura em relação à porosidade



Fonte: Autor

Figura 40 – Valores de RTF aos 7 dias de cura em relação à porosidade



Fonte: Autor

Figura 41 – Valores de RTF aos 91 dias de cura em relação à porosidade

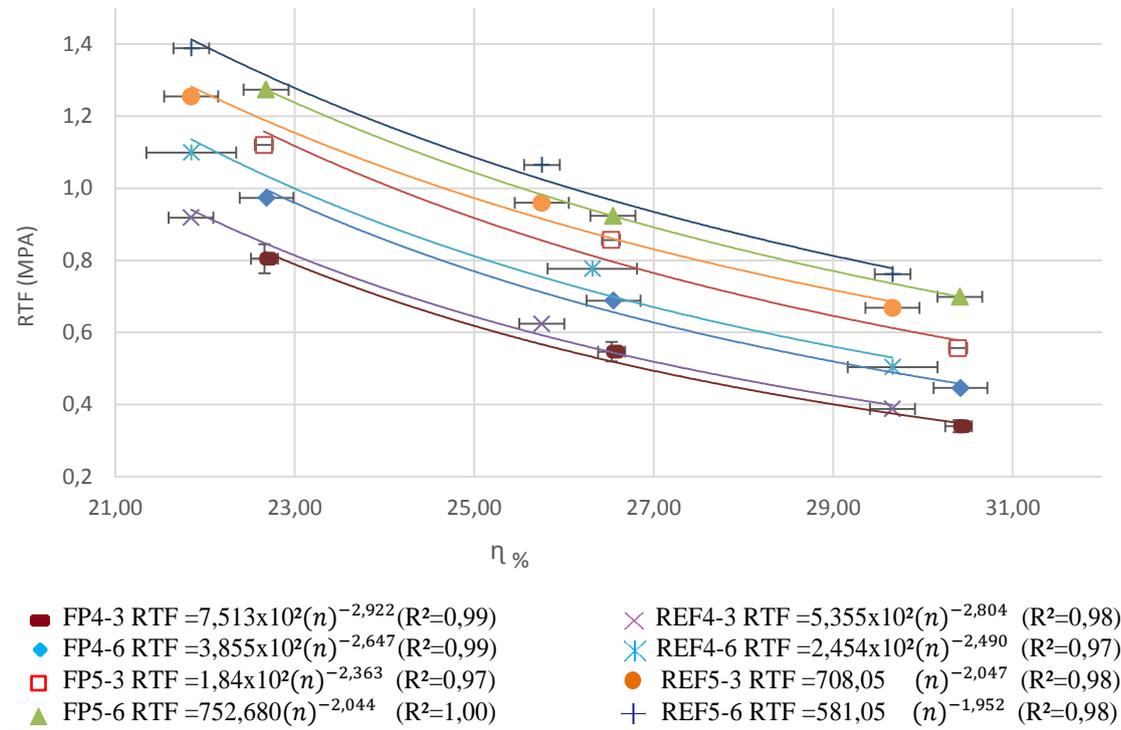


Figura 42 – Valores de RTCD aos 7 dias de cura em relação à porosidade

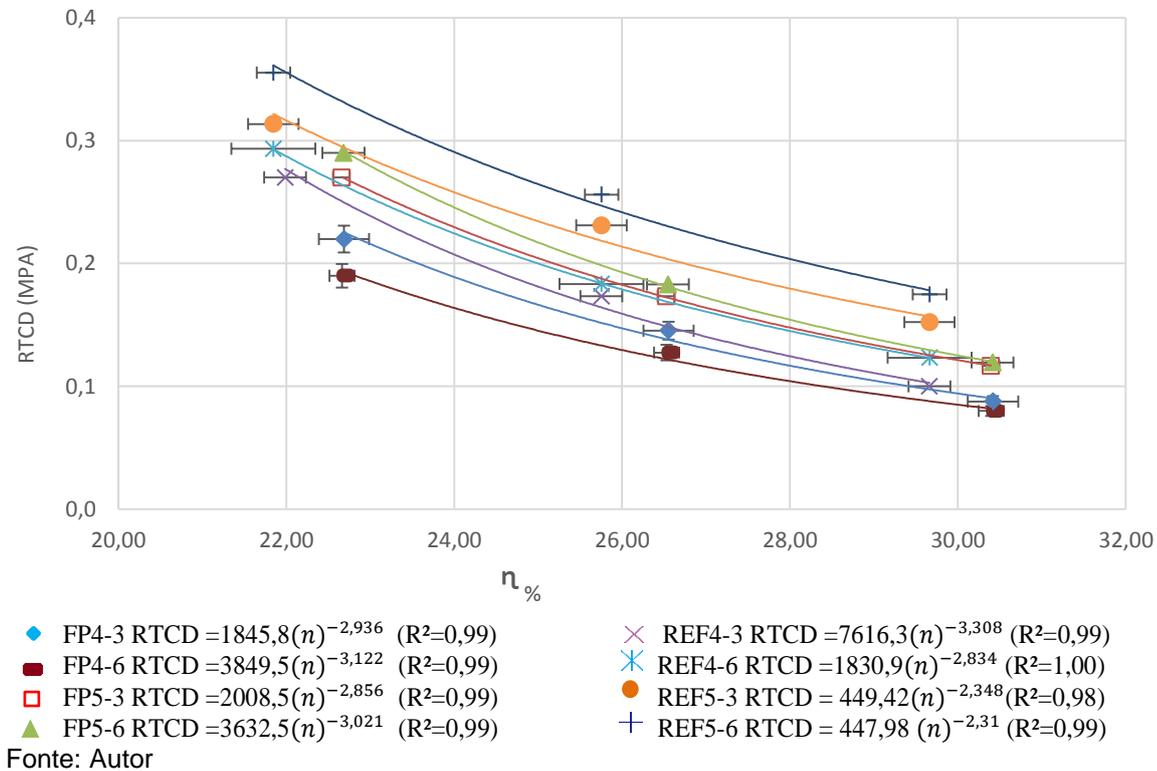


Figura 43 – Valores de RTCD aos 91 dias de cura em relação à porosidade

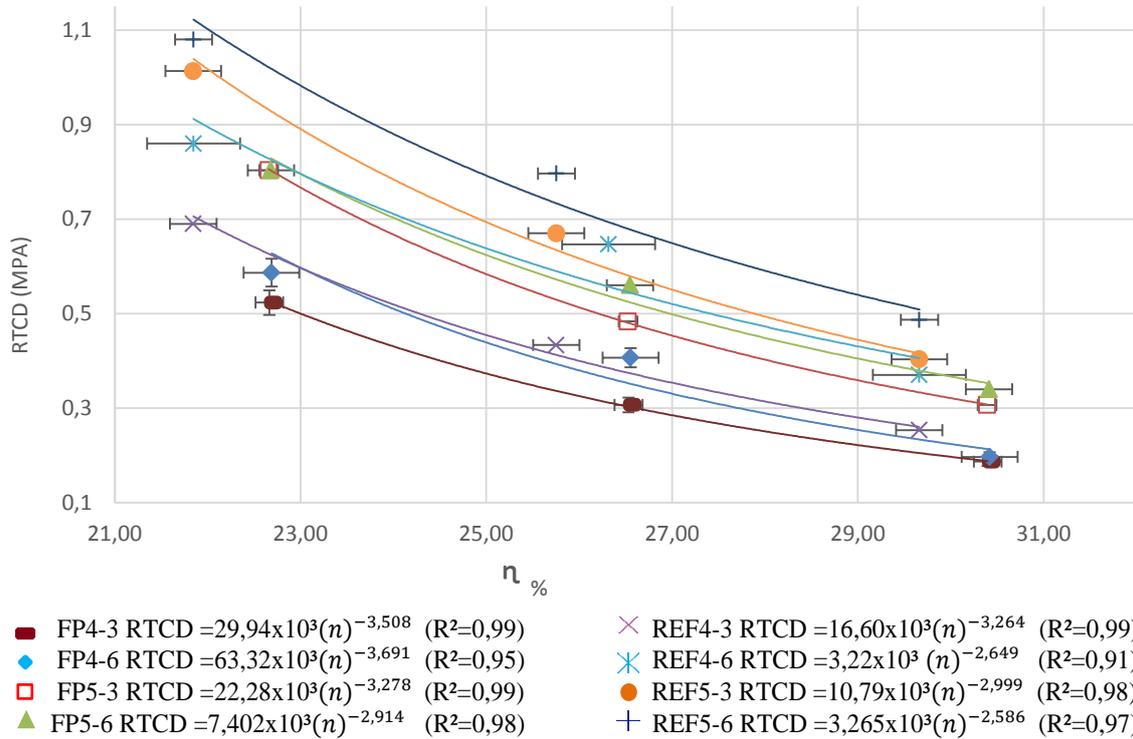


Figura 44 – Valores de MR aos 7 dias de cura em relação à porosidade

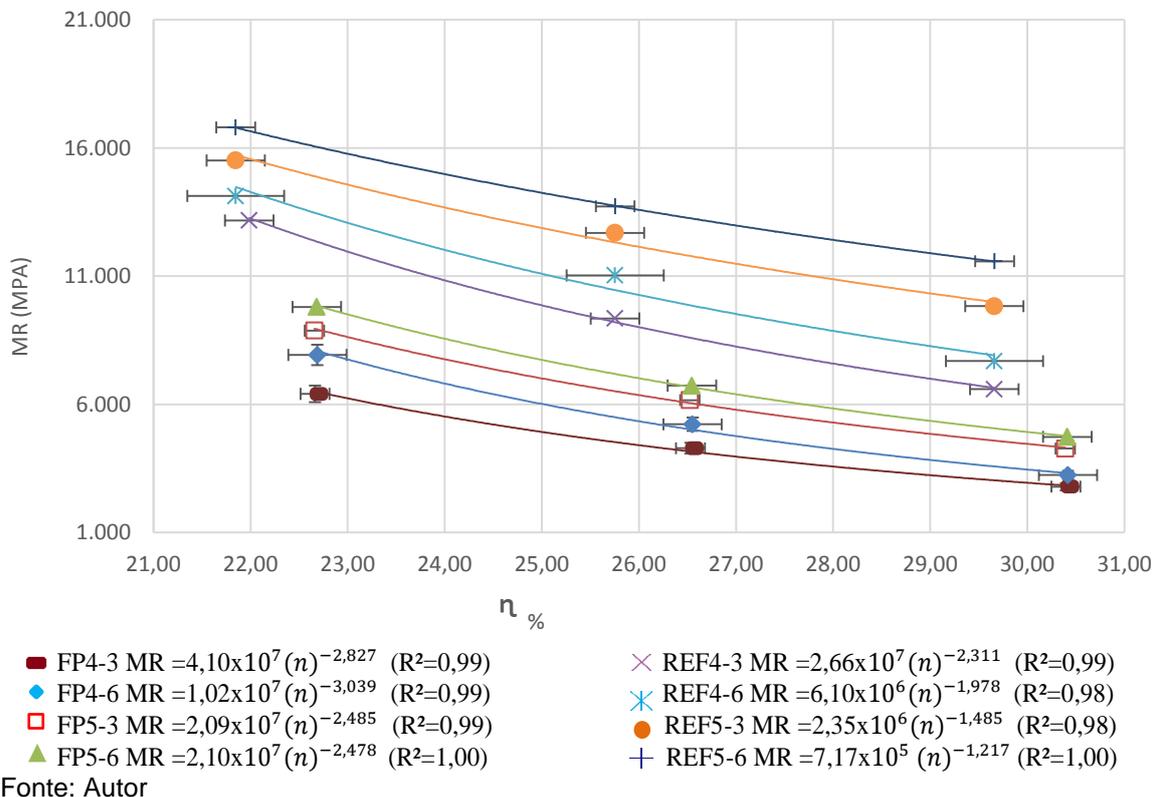
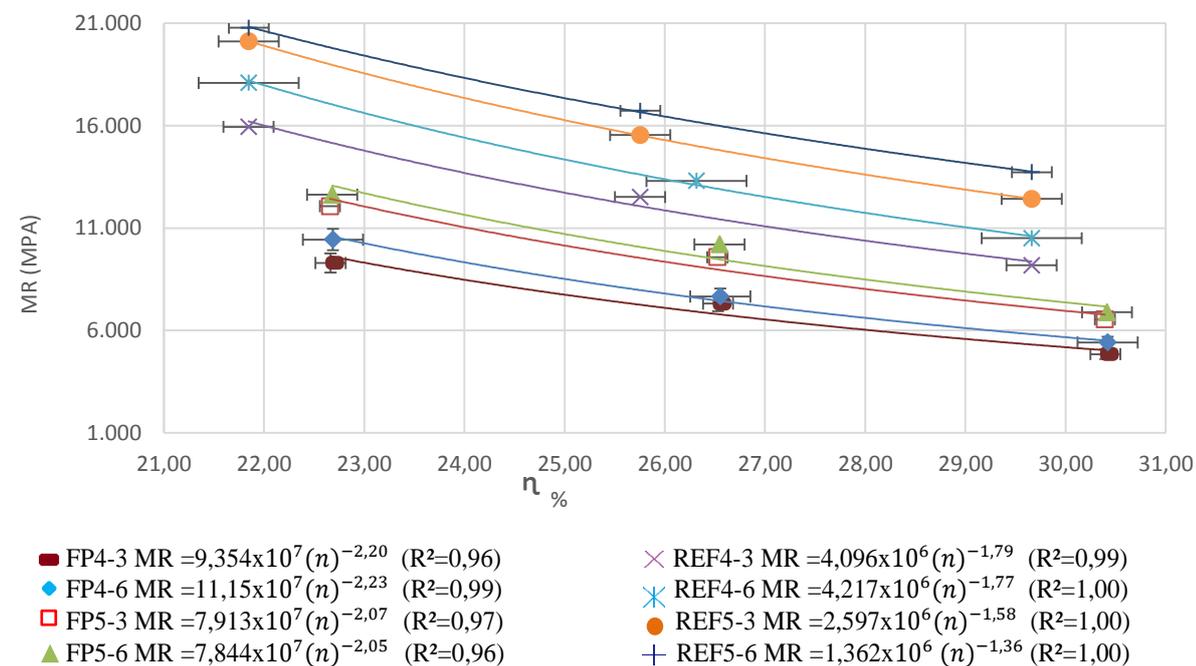


Figura 45 – Valores de MR aos 91 dias de cura em relação à porosidade



A relação existente da porosidade com a resistência mecânica é visível devido à variação de valores encontrados de resistência e módulo quando ocorrido a mudança do grau de compactação das misturas elaboradas. A participação do agente cimentante, no entanto, está ligada à compactação correta e ao teor de umidade adotado, pois o aumento da resistência está diretamente atrelado ao grau de compactação. Para um mesmo teor de material cimentante, é possível obter diferentes resistências apenas com alteração na compactação da mistura. Quanto menor a porosidade e maior o percentual de material cimentante, melhores são os resultados. Tal efeito foi descrito em diversos trabalhos (INGLES; METCALF, 1972; FOPPA, 2005; DALLA ROSA, 2009; PASCHE, 2016; SILVA, 2018). Para Silva 2018, a redução da porosidade com incremento de material cimentante influencia diretamente no aumento da resistência das misturas granulares. Este efeito, segundo o mesmo, se deve à melhor formação de vínculos entre os agregados. Nos resultados apresentados, quanto menor o valor de  $\eta\%$ , melhores são os resultados encontrados. A variação da porosidade para as misturas de fresado e pó de pedra (FP) foi calculada segundo a equação 12, sendo de 29,66% para a densidade de  $\gamma d = 1,80 \text{ g/cm}^3$ ; 25,65% para  $\gamma d = 1,9 \text{ g/cm}^3$  e de 21,65% para  $\gamma d = 2,0 \text{ g/cm}^3$ . As diferenças existentes entre as variações de porosidade foram de 4,01% entre 1,80 e 1,90  $\text{g/cm}^3$  e 4,00% entre 1,90 e 2,0  $\text{g/cm}^3$ . Tal efeito sugere um comportamento

linear das misturas, a mesma relação foi observada por Silva (2018), em seus experimentos com fresado e cimento CP V para densidades de  $1,9\text{g/cm}^3$ ,  $2,0\text{g/cm}^3$  e  $2,1\text{g/cm}^3$ .

Para o MR, os valores dos traços de referência (REF) se mostraram melhores que os traços analisados que utilizaram o material fresado independentemente dos percentuais de material cimentício. Tais resultados podem ter ocorrido devido à existência do ligante nas misturas do RAP, ou por influência do tipo de fresagem realizada (tamanho do agregado gerado), características físico-químicas ocorridas devido à passagem do tráfego e fatores ambientais devido ao tempo de uso da via. Os valores médios de resistências estão apresentados na Tabela 23 a 26, assim como os valores de desvio padrão e coeficiente de variação. Para a porosidade, os valores foram encontrados conforme a Equação 12, obedecendo aos requisitos de aceitação descritos no item 3.3.3 deste trabalho.

#### 4.3 POROSIDADE/TEOR DE MATERIAL CIMENTANTE

Nas figuras 47 a 54, são apresentadas as curvas formadas pela variação da resistência e módulos devido à relação porosidade teor de material cimentante. Os pontos seguem o mesmo padrão anteriormente descrito.

A partir da análise das figuras mencionadas, pode-se perceber que existe uma relação de acréscimos de resistência à medida que a porosidade é diminuída, e que o material cimentante é um fator que colabora na resistência final da mistura, pois produz melhor união entre as partículas do material de formação mineral. Os experimentos realizados por Pasche (2016) e Silva (2018) descrevem a influência da relação da porosidade e do teor volumétrico de material cimentante, a qual ficou evidenciada nesta pesquisa. Outro fator de importância é a homogeneidade da mistura fato relatado por Silva (2018). Quando se tem uma mistura com melhor intertravamento interno, pode-se chegar a melhores resultados para resistência e rigidez. Desta forma, o modo como ocorre a fresagem tem um papel fundamental para o dimensionamento e dosagem da mistura, com incremento ou sem de material virgem.

Ainda, quando comparados os resultados, é perceptível a existência da relação entre a porosidade/teor volumétrico de material cimentante, podendo, dessa forma, serem dosado valores de cimento e grau de compactação para obras de

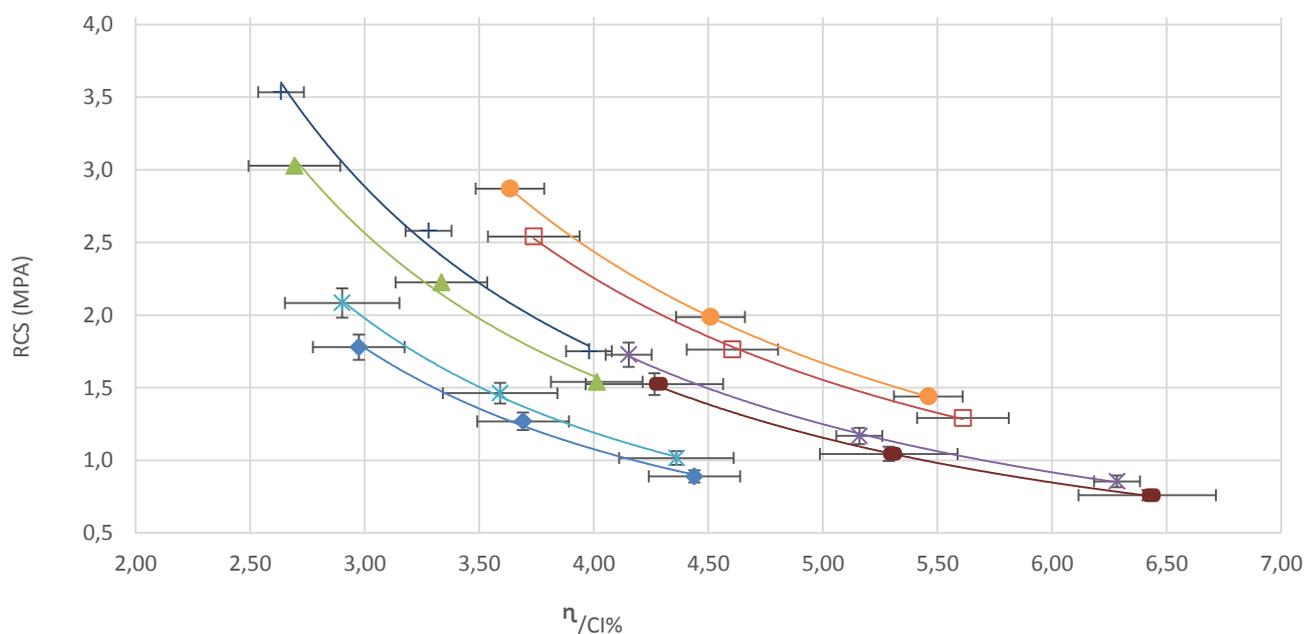
pavimentação. Nos ensaios realizados, obtiveram-se bons dados de correlações. Ainda, conforme descrito por Silva 2018, quando encontrados graus de compactação diferentes do estipulado em projeto, o projetista poderá, de posse do teor de material cimentante usado, estipular se tal grau é mínimo para fluxo de veículos da via, facilitando assim o controle de camadas cimentadas. A Tabela 27 apresenta os valores médios de porosidade/teor de material cimentante, encontrados a partir das equações 12 e 14. Os valores de resistência e módulos estão descritos nas Tabelas 23 a 26.

Tabela 27 – Valor médio de porosidade/teor de material cimentante

Traço		$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	n/Ci% (7 dias)		n/Ci% (91 dias)		Desvio Padrão 7 dias (MPa)		Coeficiente de variação (%)		Desvio Padrão 91 dias (MPa)		Coeficiente de variação (%)	
CIMENTO	CAL		REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP	REF	FP
4,0	3,0	1,80	6,28	6,42	6,27	6,41	0,020	0,004	0,32%	0,06%	0,014	0,014	0,22%	0,22%
		1,90	5,16	5,29	5,12	5,23	0,040	0,015	0,78%	0,28%	0,005	0,040	0,10%	0,76%
		2,00	4,15	4,26	4,15	4,26	0,015	0,023	0,35%	0,55%	0,013	0,013	0,31%	0,31%
4,0	6,0	1,80	4,36	4,44	4,36	4,43	0,017	0,034	0,40%	0,76%	0,034	0,030	0,78%	0,69%
		1,90	3,59	3,69	3,58	3,67	0,025	0,018	0,69%	0,50%	0,022	0,010	0,62%	0,27%
		2,00	2,90	2,97	2,88	2,96	0,014	0,006	0,48%	0,22%	0,011	0,026	0,40%	0,86%
5,0	3,0	1,80	5,46	5,61	5,47	5,60	0,035	0,014	0,65%	0,24%	0,035	0,026	0,64%	0,46%
		1,90	4,51	4,61	4,45	4,61	0,002	0,031	0,04%	0,68%	0,009	0,027	0,21%	0,59%
		2,00	3,63	3,74	3,62	3,73	0,035	0,009	0,95%	0,24%	0,019	0,008	0,54%	0,21%
5,0	6,0	1,80	3,98	4,01	3,96	4,04	0,007	0,011	0,17%	0,28%	0,009	0,015	0,23%	0,37%
		1,90	3,28	3,34	3,26	3,31	0,006	0,007	0,19%	0,20%	0,026	0,010	0,78%	0,29%
		2,00	2,63	2,69	2,63	2,69	0,018	0,020	0,68%	0,76%	0,013	0,021	0,49%	0,76%

Fonte: Autor

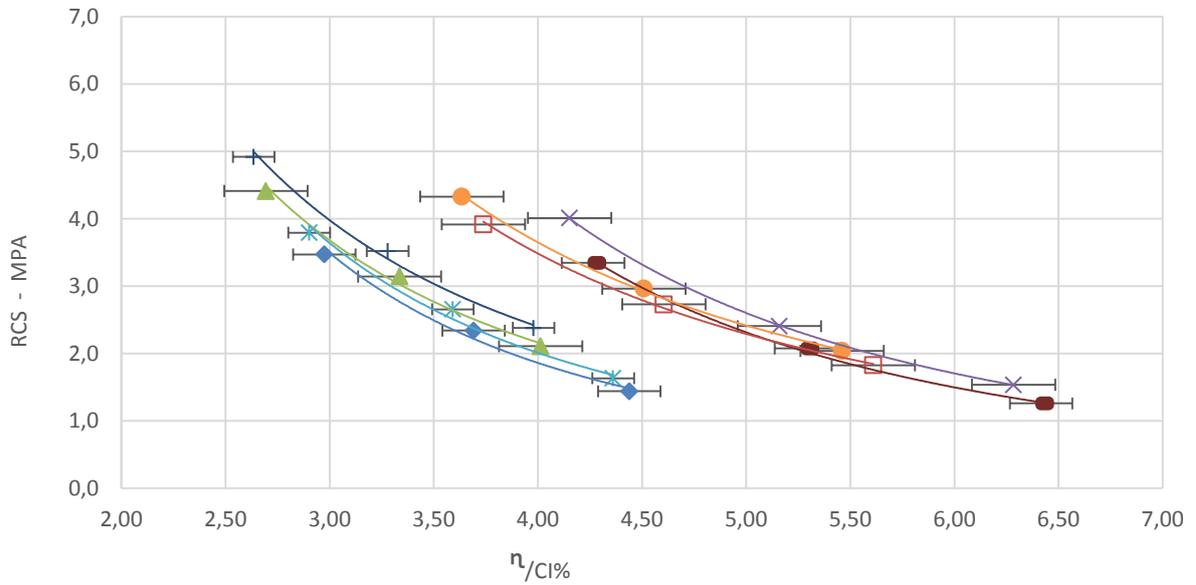
Figura 46 – RCS relacionado  $\eta/C_{i\%}$  para o período de cura de 7 dias



- FP4-3 RCS =  $19,791(n/Ci\%)^{-1,792}$  ( $R^2=0,99$ )
- ◆ FP4-6RCS =  $12,466(n/Ci\%)^{-1,801}$  ( $R^2=0,99$ )
- FP5-3 RCS =  $23,825(n/Ci\%)^{-1,717}$  ( $R^2=0,99$ )
- ▲ FP5-6RCS =  $16,797(n/Ci\%)^{-1,729}$  ( $R^2=0,99$ )
- × REF4-3 RCS =  $20,767(n/Ci\%)^{-1,772}$  ( $R^2=0,99$ )
- \* REF4-6RCS =  $14,316(n/Ci\%)^{-1,825}$  ( $R^2=0,99$ )
- REF5-3 RCS =  $26,591(n/Ci\%)^{-1,739}$  ( $R^2=1,00$ )
- + REF5-6 RCS =  $19,044(n/Ci\%)^{-1,734}$  ( $R^2=0,99$ )

Fonte: Autor

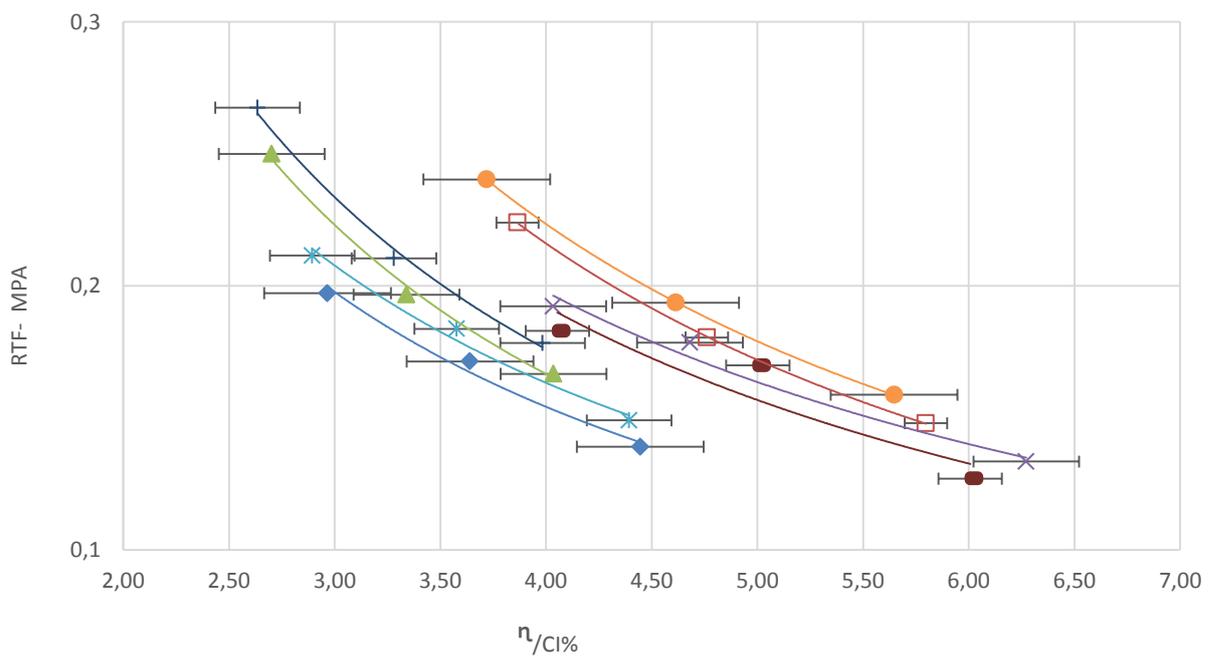
Figura 47 – RCS relacionado  $\eta/Ci\%$  para o período de cura de 91 dias



- FP4-3 RCS =  $107,95(n/Ci\%)^{-2,387}$  ( $R^2=0,99$ )
- ◆ FP4-6RCS =  $38,563(n/Ci\%)^{-2,186}$  ( $R^2=0,98$ )
- FP5-3 RCS =  $47,053(n/Ci\%)^{-1,878}$  ( $R^2=0,99$ )
- ▲ FP5-6RCS =  $27,914(n/Ci\%)^{-1,845}$  ( $R^2=0,99$ )
- × REF4-3 RCS =  $108,27(n/Ci\%)^{-2,317}$  ( $R^2=0,99$ )
- \* REF4-6RCS =  $35,041(n/Ci\%)^{-2,062}$  ( $R^2=0,98$ )
- REF5-3 RCS =  $47,148(n/Ci\%)^{-1,846}$  ( $R^2=0,99$ )
- + REF5-6 RCS =  $27,239(n/Ci\%)^{-1,751}$  ( $R^2=0,99$ )

Fonte: Autor

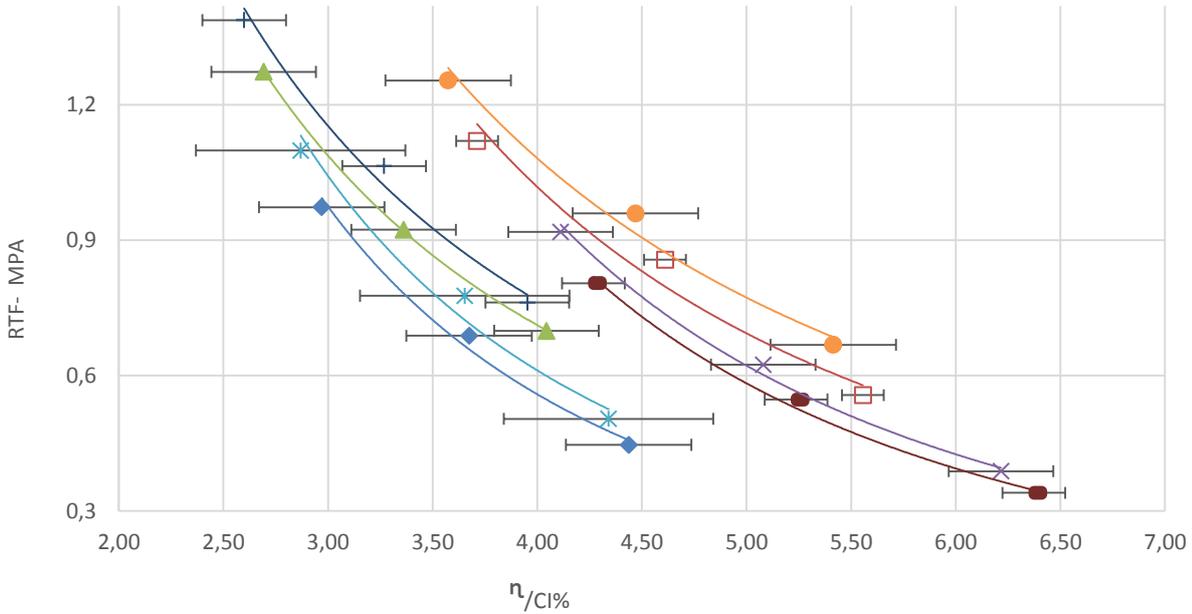
Figura 48 – RTF relacionado  $\eta/Ci\%$  para o período de cura de 7 dias



- FP4-3 RTF =  $0,682(n/Ci\%)^{-0,914}$  ( $R^2=0,87$ )
- ◆ FP4-6 RTF =  $0,510(n/Ci\%)^{-0,863}$  ( $R^2=0,98$ )
- FP5-3 RTF =  $0,892(n/Ci\%)^{-1,023}$  ( $R^2=0,99$ )
- ▲ FP5-6 RTF =  $0,679(n/Ci\%)^{-1,014}$  ( $R^2=0,99$ )
- × REF4-3 RTF =  $0,642(n/Ci\%)^{-0,850}$  ( $R^2=0,97$ )
- \* REF4-6 RTF =  $0,520(n/Ci\%)^{-0,837}$  ( $R^2=0,98$ )
- REF5-3 RTF =  $1,100(n/Ci\%)^{-1,123}$  ( $R^2=0,99$ )
- + REF5-6 RTF =  $0,688(n/Ci\%)^{-0,983}$  ( $R^2=0,99$ )

Fonte: Autor

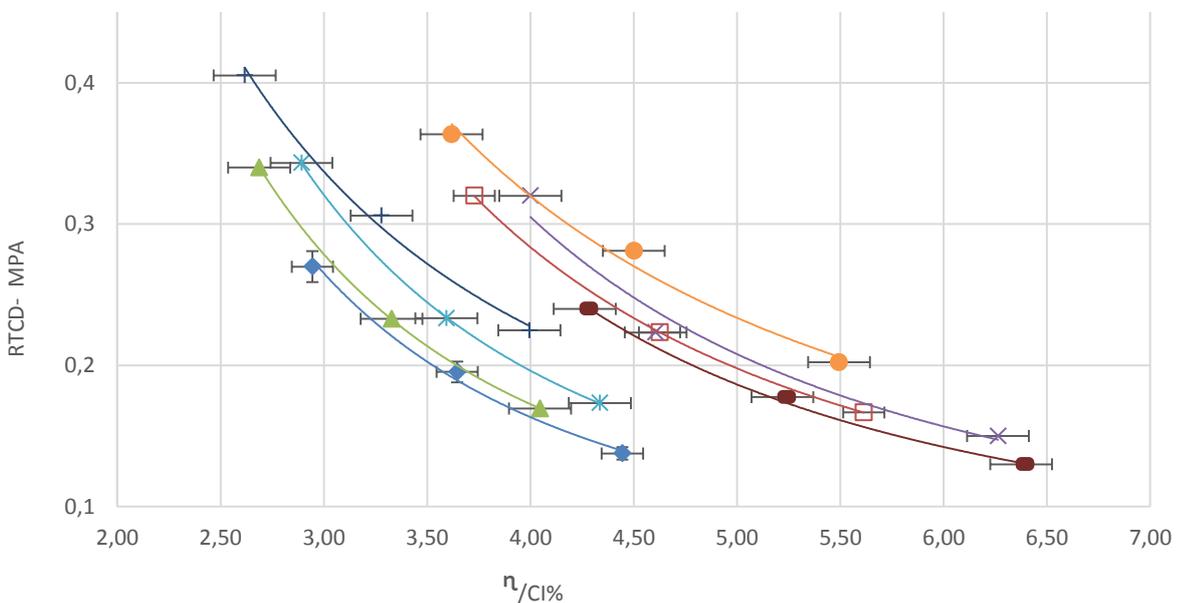
Figura 49 – RTF relacionado  $\eta/Ci\%$  para o período de cura de 91 dias



- FP4-3 RTF =  $18,43(n/Ci\%)^{-2,146}$  ( $R^2=0,99$ )
- ◆ FP4-6 RTF =  $8,168(n/Ci\%)^{-1,935}$  ( $R^2=0,99$ )
- FP5-3 RTF =  $11,051(n/Ci\%)^{-1,72}$  ( $R^2=0,97$ )
- ▲ FP5-6 RTF =  $5,486(n/Ci\%)^{-1,473}$  ( $R^2=0,99$ )
- × REF4-3 RTF =  $17,74(n/Ci\%)^{-2,082}$  ( $R^2=0,99$ )
- \* REF4-6 RTF =  $7,992(n/Ci\%)^{-1,854}$  ( $R^2=0,97$ )
- REF5-3 RTF =  $8,736(n/Ci\%)^{-1,507}$  ( $R^2=0,98$ )
- + REF5-6 RTF =  $5,494(n/Ci\%)^{-1,421}$  ( $R^2=0,98$ )

Fonte: Autor

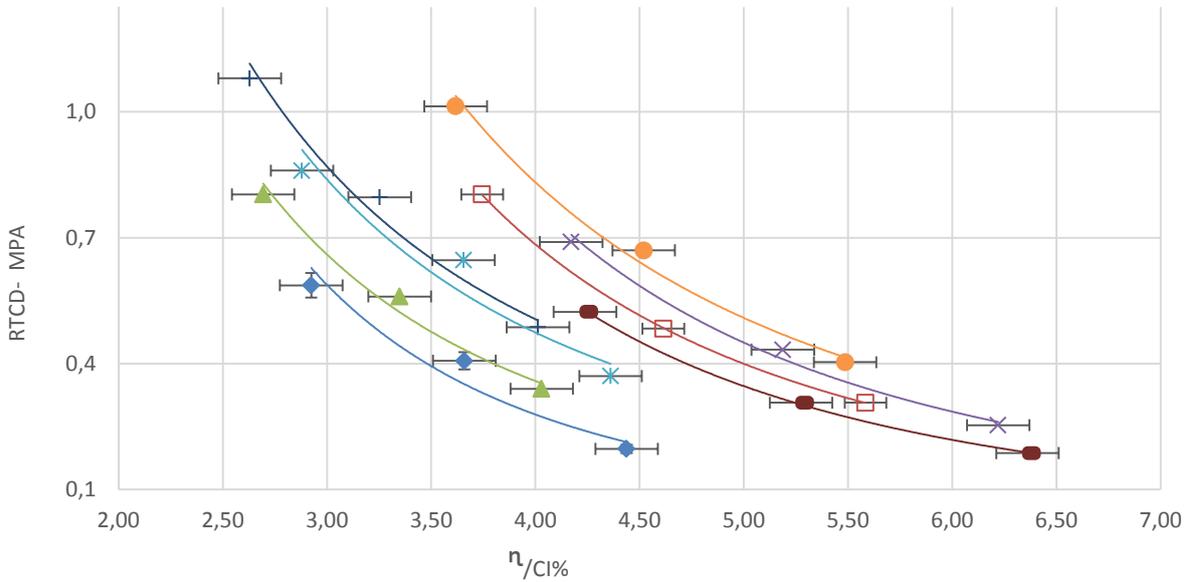
Figura 50 – RTCD relacionado  $\eta/Ci\%$  para o período de cura de 7 dias



- FP4-3 RTCD =  $4,331(n/Ci\%)^{-2,148}$  ( $R^2=0,99$ )
- ◆ FP4-6 RTCD =  $2,489(n/Ci\%)^{-2,228}$  ( $R^2=0,99$ )
- FP5-3 RTCD =  $4,006(n/Ci\%)^{-2,050}$  ( $R^2=1,00$ )
- ▲ FP5-6 RTCD =  $2,841(n/Ci\%)^{-2,14}$  ( $R^2=0,99$ )
- ✕ REF4-3 RTCD =  $4,996(n/Ci\%)^{-2,146}$  ( $R^2=0,97$ )
- ✧ REF4-6 RTCD =  $2,473(n/Ci\%)^{-2,168}$  ( $R^2=1,00$ )
- REF5-3 RTCD =  $2,949(n/Ci\%)^{-1,725}$  ( $R^2=0,98$ )
- + REF5-6 RTCD =  $1,799(n/Ci\%)^{-1,671}$  ( $R^2=0,99$ )

Fonte: Autor

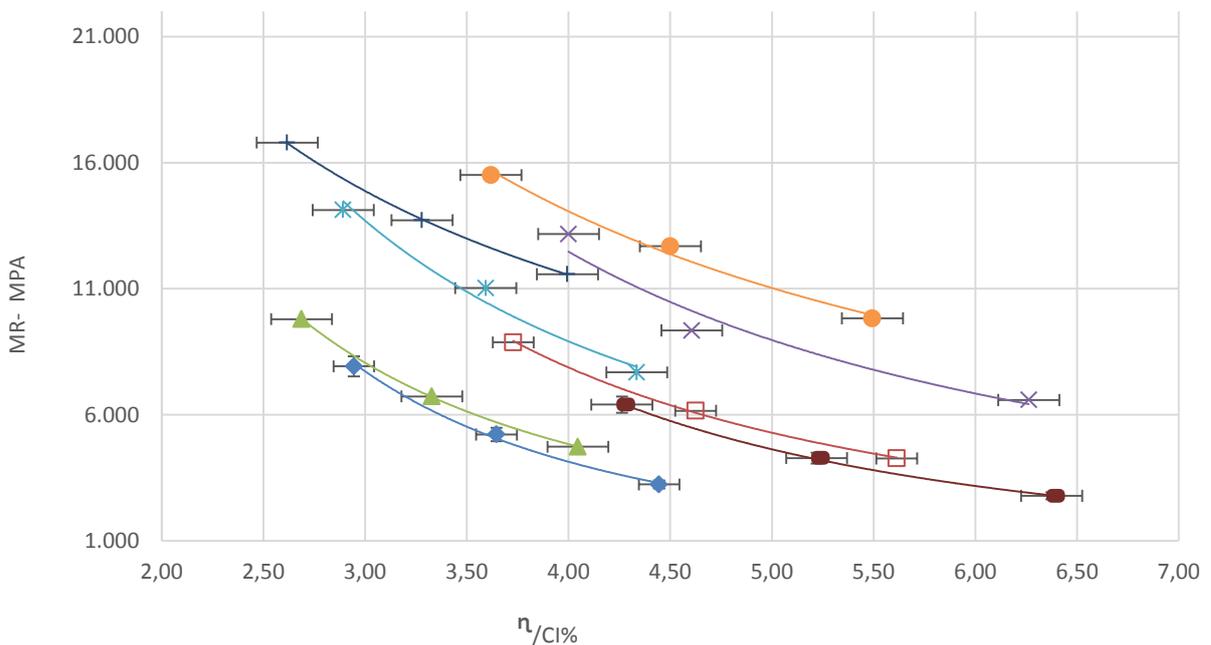
Figura 51 – RTCD relacionado  $\eta/Ci\%$  para o período de cura de 91 dias



- FP4-3 RTCD =  $20,477(n/Ci\%)^{-2,536}$  ( $R^2=0,99$ )
- ◆ FP4-6 RTCD =  $10,162(n/Ci\%)^{-2,594}$  ( $R^2=0,94$ )
- FP5-3 RTCD =  $19,327(n/Ci\%)^{-2,410}$  ( $R^2=1,00$ )
- ▲ FP5-6 RTCD =  $6,7828(n/Ci\%)^{-2,121}$  ( $R^2=0,98$ )
- ✕ REF4-3 RTCD =  $24,980(n/Ci\%)^{-2,496}$  ( $R^2=0,99$ )
- ✧ REF4-6 RTCD =  $7,4125(n/Ci\%)^{-1,983}$  ( $R^2=0,92$ )
- REF5-3 RTCD =  $17,637(n/Ci\%)^{-2,203}$  ( $R^2=0,99$ )
- + REF5-6 RTCD =  $6,8925(n/Ci\%)^{-1,884}$  ( $R^2=0,98$ )

Fonte: Autor

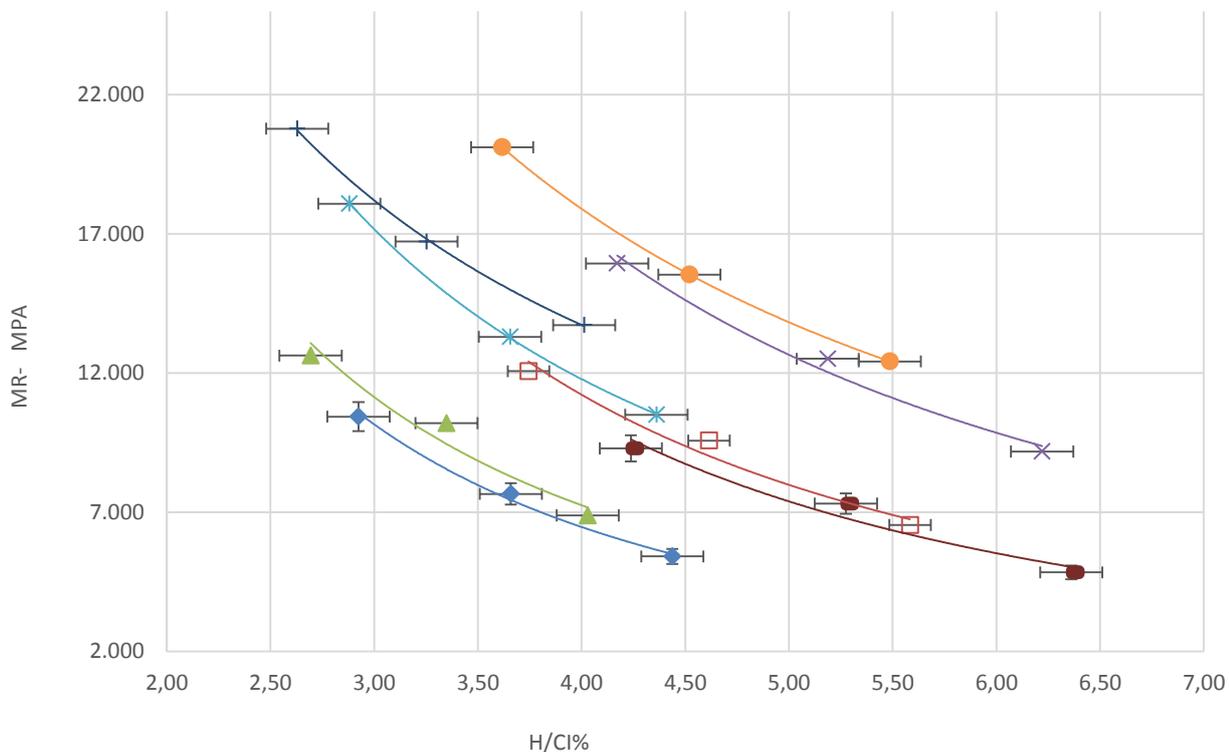
Figura 52 – MR relacionado  $\eta/Ci\%$  para o período de cura de 7 dias



- FP4-3 MR =  $128,88 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-2,067}$  (R<sup>2</sup>=0,99)
- ◆ FP4-6 MR =  $83,65 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-2,169}$  (R<sup>2</sup>=0,99)
- FP5-3 MR =  $93,460 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,784}$  (R<sup>2</sup>=1,00)
- ▲ FP5-6 MR =  $56,870 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,778}$  (R<sup>2</sup>=0,99)
- × REF4-3 MR =  $96,873 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,479}$  (R<sup>2</sup>=0,95)
- \* REF4-6 MR =  $70,710 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,494}$  (R<sup>2</sup>=0,97)
- REF5-3 MR =  $63,814 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,091}$  (R<sup>2</sup>=0,99)
- + REF5-6 MR =  $39,123 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-0,880}$  (R<sup>2</sup>=0,99)

Fonte: Autor

Figura 53 – MR relacionado  $\eta/Ci\%$  para o período de cura de 91 dias



- FP4-3 MR =  $95,862 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,592}$  (R<sup>2</sup>=0,96)
- ◆ FP4-6 MR =  $56,879 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,568}$  (R<sup>2</sup>=0,99)
- FP5-3 MR =  $93,014 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,525}$  (R<sup>2</sup>=0,97)
- ▲ FP5-6 MR =  $57,298 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,491}$  (R<sup>2</sup>=0,95)
- × REF4-3 MR =  $115,03 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,371}$  (R<sup>2</sup>=0,98)
- \* REF4-6 MR =  $72,277 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,308}$  (R<sup>2</sup>=0,99)
- REF5-3 MR =  $89,064 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-1,157}$  (R<sup>2</sup>=1,00)
- + REF5-6 MR =  $53,510 \times 10^3 (n/Ci\%)^{-0,981}$  (R<sup>2</sup>=0,99)

Fonte: Autor

#### 4.4 RELAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS E DURABILIDADE DA CAMADA CIMENTADA

A utilização de misturas com incremento de material cimentício tem como característica uma elevada rigidez. Assim é necessário uma alta resistência à tração devido à concentração de esforços em seu interior. A análise de valores do Módulo de Resiliência é bastante complexa, pois dependendo da estrutura onde será inserido o material, valores maiores ou menores são tolerados. Desta forma é necessária uma compatibilização da rigidez entre as camadas que constituem o sistema (PIRES, 2014). Ainda segundo Balbo (2006) os problemas da incorporação

de uma BGTC nas estruturas de pavimentos para rodovias de tráfego pesado, são principalmente porque esse material possui uma grande heterogeneidade em sua matriz, o que acaba gerando descontinuidades em sua estrutura interna e ocasiona uma perda de resistência à fratura, tornando-se vulnerável a fadiga.

Para Pasche (2016) e Silva (2018) os problemas de fadiga são gerados devido à elevada rigidez das misturas e da ação do tráfego de veículos pesados. Desta forma as relações de MR/RTCD pequenas indicam um material com melhores propriedades mecânicas, menos propício à ação da fadiga. A Tabela 28 traz os valores encontrados para MR e RTCD e suas relações para os teores de 4% e 5% cimento CP IV com adições de 3% e 6% de cal hidratada, assim como os períodos de curas utilizados.

Tabela 28 – Relação entre MR e RTCD

Cimento %	Cal %	Cura (dias)	γd (g/cm <sup>3</sup> )	Material Fresado			Cimento %	Cal %	Cura (dias)	γd (g/cm <sup>3</sup> )	Material de Referência		
				MR (MPa)	RTCD (MPa)	MR/RTD					MR (MPa)	RTCD (MPa)	MR/RTD
4	3	7	1,80	2787,20	0,09	34840,00	4	3	7	1,80	6588,16	0,12	65881,62
			1,90	4287,04	0,13	33624,81				1,90	9345,63	0,18	53917,10
			2,00	6404,80	0,20	33709,47				2,00	13170,36	0,28	48779,11
		91	1,80	4840,19	0,20	25929,60			91	1,80	9183,30	0,28	36249,87
			1,90	7310,72	0,33	23839,30				1,90	12513,90	0,45	28878,23
			2,00	9295,62	0,53	17762,32				2,00	15939,55	0,70	23100,79
4	6	7	1,80	3239,78	0,10	36954,69	4	6	7	1,80	7683,77	0,12	62300,87
			1,90	5219,55	0,15	35902,95				1,90	11026,22	0,18	60143,01
			2,00	7923,20	0,23	36040,13				2,00	14124,52	0,31	48151,76
		91	1,80	5415,07	0,23	27534,26			91	1,80	10505,25	0,32	28367,86
			1,90	7659,30	0,42	18834,33				1,90	13303,29	0,67	20572,10
			2,00	10435,20	0,60	17787,27				2,00	18087,34	0,88	21031,79
5	3	7	1,80	4271,83	0,12	36615,67	5	3	7	1,80	9825,83	0,15	64545,88
			1,90	6161,34	0,17	35546,22				1,90	12685,27	0,24	54914,59
			2,00	8874,34	0,29	32867,93				2,00	15510,00	0,34	49473,67
		91	1,80	6541,77	0,31	21331,87			91	1,80	12420,94	0,40	30795,71
			1,90	9575,94	0,51	19812,29				1,90	15540,32	0,70	23194,50
			2,00	12067,47	0,82	15021,74				2,00	20114,38	1,05	19849,72
5	6	7	1,80	4732,17	0,14	39616,72	5	6	7	1,80	11578,10	0,19	66235,46
			1,90	6730,30	0,19	36790,04				1,90	13721,41	0,28	53599,27
			2,00	9795,40	0,29	33777,24				2,00	16798,43	0,38	47292,87
		91	1,80	6885,94	0,32	20252,78			91	1,80	13725,84	0,49	28203,79
			1,90	10199,90	0,58	18214,11				1,90	16724,40	0,82	20992,97
			2,00	12629,93	0,86	15721,91				2,00	20783,05	1,10	19243,56

Fonte: Autor

Pode-se perceber que as melhores relações entre MR e RTCD ocorreram nas misturas do material fresado e pó de pedra. Tal fato foi relatado por Silva (2018), pois as misturas que apresentaram as menores relações MR/RTCD foram as que

continham a matriz pétreo formada por 70% material fresado e 30% pó de pedra. Tal efeito se deve principalmente pelo MR das misturas de BGTC ser mais elevado que das misturas com RAP devido as ligações cimentícias serem melhores com o agregado natural, pois não existe a presença do ligante asfáltico. Ainda a RTCD das misturas com fresado foi de aproximadamente 80% da resistência da BGTC, tal diferença torna as misturas menos suscetíveis a ação da fadiga. Essa análise pode evidenciar que do ponto de vista da rigidez *versus* resistência à tração, as misturas com material fresado apresentam uma maior capacidade de absorção das energias de deformação, sendo essa uma das principais análises a se fazer para verificar o comportamento a fadiga de materiais cimentados.

Ainda, para o período inicial de cura de 7 dias, ocorreu pouca mudança entre as misturas. Isso se deve principalmente ao material cimentante utilizado com características de cura para períodos maiores. Já, para o período de cura de 91 dias, obtiveram-se variações maiores de RTCD e MR, evidenciando novamente maior rigidez das amostras com esqueleto mineral totalmente pétreo (REF). Para o material fresado e pó, os valores demonstram propriedades mecânicas semelhantes às das pesquisas do referencial bibliográfico, ficando 35% menores que os valores da BGTC. Para o período de cura de 91 dias, tornou-se perceptível o acréscimo de resistência devido ao grau de compactação e também do incremento de resistência devido à mudança do percentual de material cimentante. Outro fato a ser observado e descrito por Pasche (2016) foi que com o aumento da massa específica, as amostras apresentaram evolução nos valores de RTCD, fazendo com que a relação MR/RTCD diminuísse, aumentando a capacidade de absorção das energias de deformação.

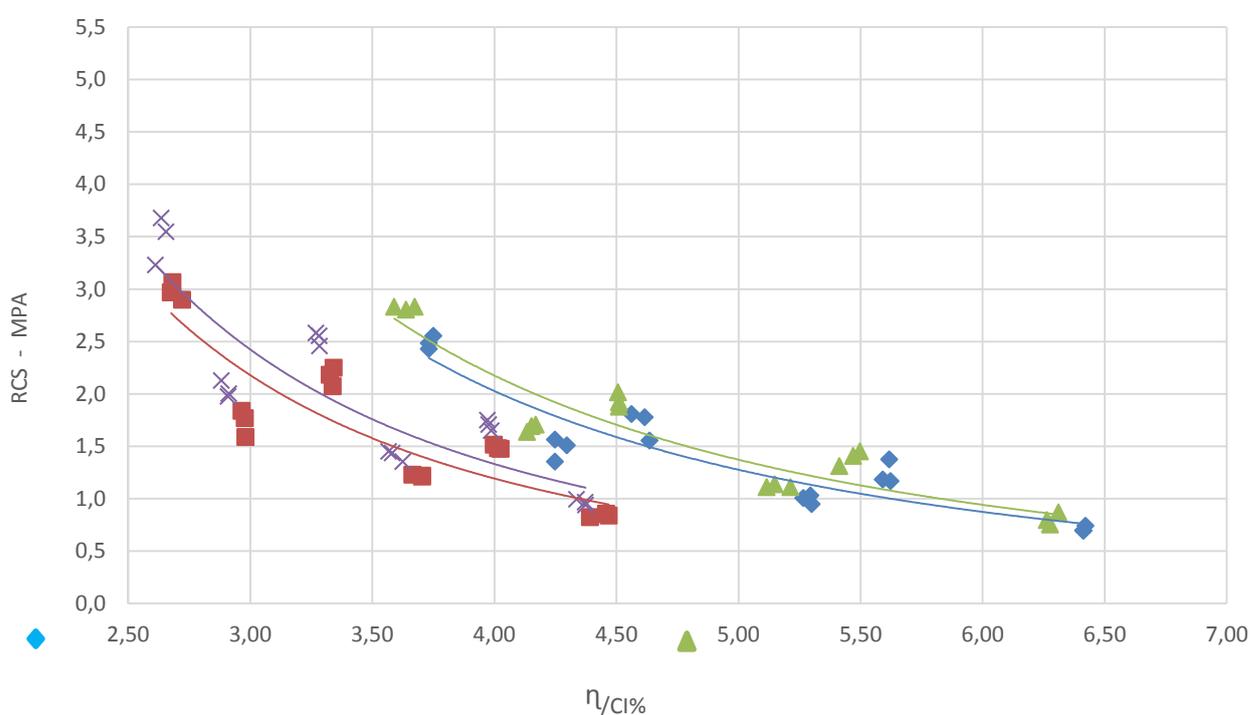
#### 4.5 COMPARAÇÕES ENTRE TEORES DIFERENTES DE CIMENTO E CAL

Para efeito de comparação de resistências foi realizada a montagem de gráficos com teores de cimento diferentes para o mesmo percentual de cal. As Figuras 55 a 62 trazem a resistência encontrada em relação ao  $\eta/C_{i\%}$ .

Os resultados demonstram o crescimento da resistência com o aumento do percentual de 1% para o teor de cal de 3%. O acréscimo de cimento, mesmo que em pequenos percentuais, possui influencia no ganho de resistência, assim como o aumento do percentual da cal. Para o período inicial de 7 dias de cura, as

resistências tiveram aceitação com a compactação acima de  $2,0\text{g/cm}^3$ , conforme a DNIT 167/13 (RTCD  $0,25 - 0,35\text{MPa}$  e RCS para  $2,1 - 2,5\text{MPa}$ ), pois, nesse período, o cimento CP IV possui baixa resistência, característica do material. Ainda, com a adição da cal, foi possível verificar acréscimo moderado de resistência no período inicial de 7 dias. Dessa forma para seu uso em rodovias, a compactação deve ser fator determinante para o desempenho inicial da mistura.

Figura 54 – Relação entre RCS e  $\eta/Ci\%$  para diferentes teores de cimento aos 7 dias



$$\text{FP4-3 e FP5-3} = 3,593 \times 10 (n/Ci\%)^{-2,074} \quad (R^2=0,86)$$

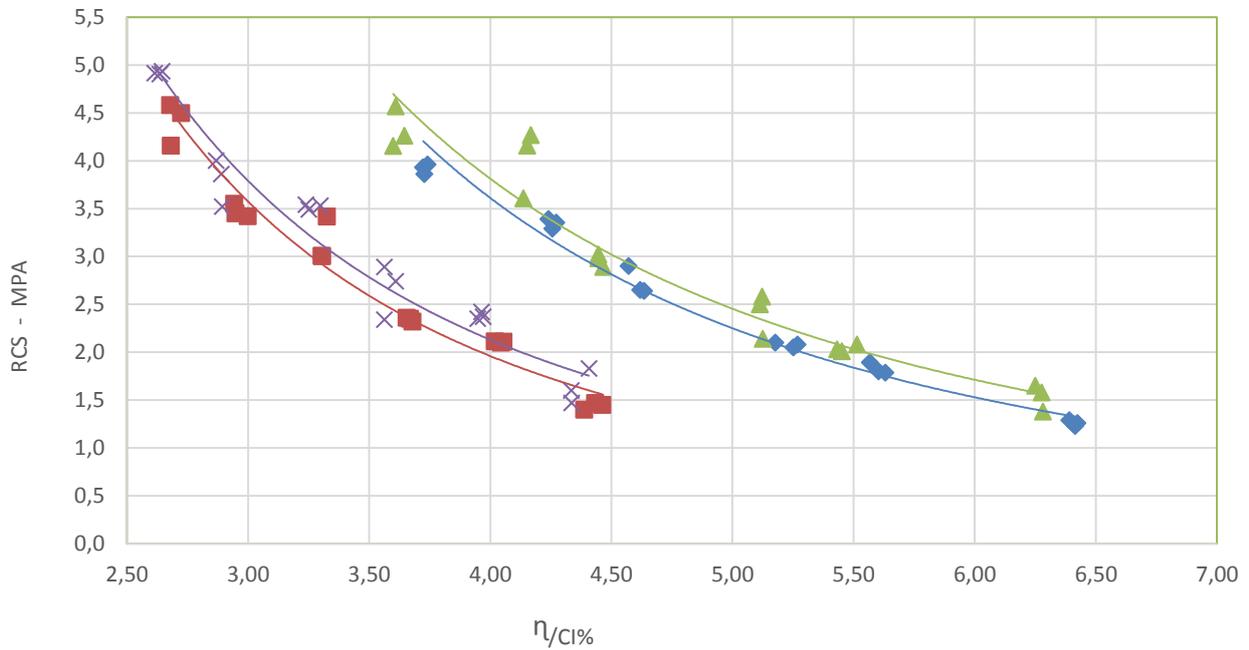
$$\text{FP4-6 e FP5-6} = 2,177 \times 10 (n/Ci\%)^{-2,095} \quad (R^2=0,79)$$

$$\text{REF4-3 e REF4-6} = 3,804 \times 10 (n/Ci\%)^{-2,064}$$

$$\text{REF4-6 e REF5-6} = 2,387 \times 10 (n/Ci\%)^{-2,082}$$

Fonte: Autor

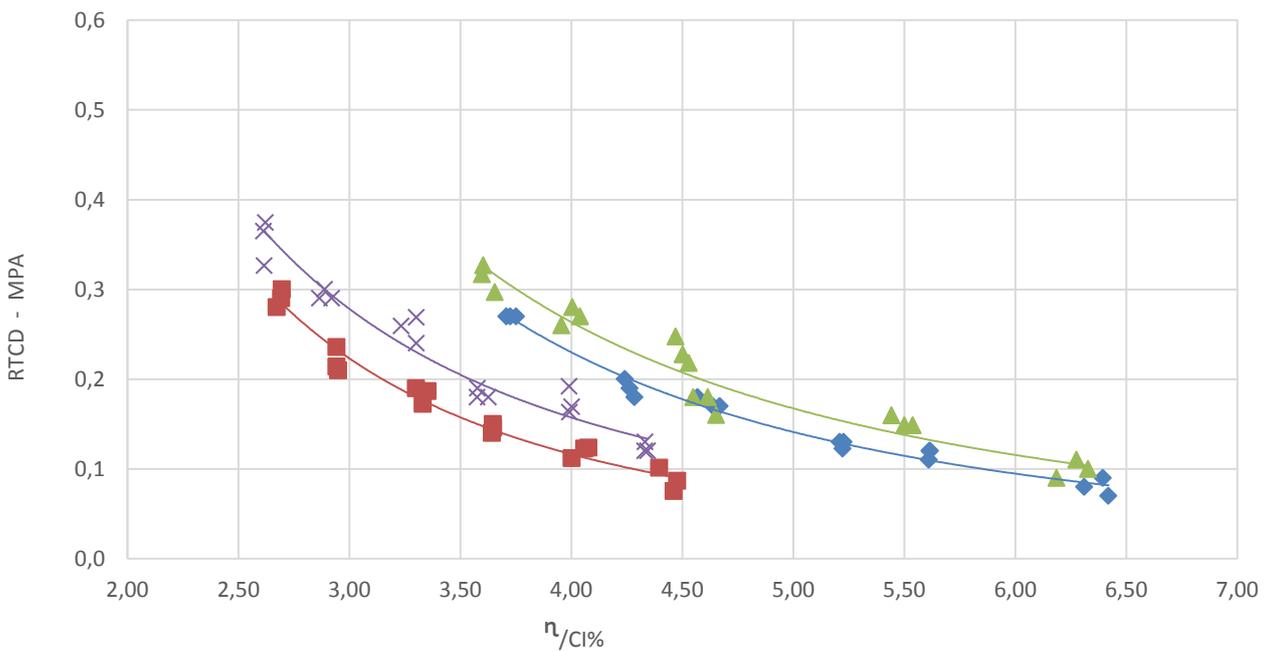
Figura 55 – Relação entre RCS e  $\eta/C_{i\%}$  para diferentes teores de cimento aos 91 dias



◆ FP4-3 e FP5-3 =  $6,828 \times 10(n/C_{i\%})^{-2,120}$  ( $R^2=0,98$ )  
■ FP4-6 e FP5-6 =  $3,543 \times 10(n/C_{i\%})^{-2,088}$  ( $R^2=0,95$ )  
▲ REF4-3 e REF4-6 =  $5,891 \times 10(n/C_{i\%})^{-1,978}$   
× REF4-6 e REF5-6 =  $3,421 \times 10(n/C_{i\%})^{-2,003}$

Fonte: Autor

Figura 56 – Relação entre RTCD e  $\eta/C_{i\%}$  para diferentes teores de cimento aos 7 dias



dias

◆ FP4-3 e FP5-3 =  $4,756(n/Ci\%)^{-2,185}$  ( $R^2=0,97$ )  
■ FP4-6 e FP5-6 =  $2,671(n/Ci\%)^{-2,260}$  ( $R^2=0,97$ )  
 Fonte: Autor

▲ REF4-3 e REF4-6 =  $4,411(n/Ci\%)^{-2,033}$   
× REF4-6 e REF5-6 =  $2,456(n/Ci\%)^{-1,982}$

Figura 57 – Relação entre RTCD e  $\eta/Ci\%$  para diferentes teores de cimento aos 91 dias

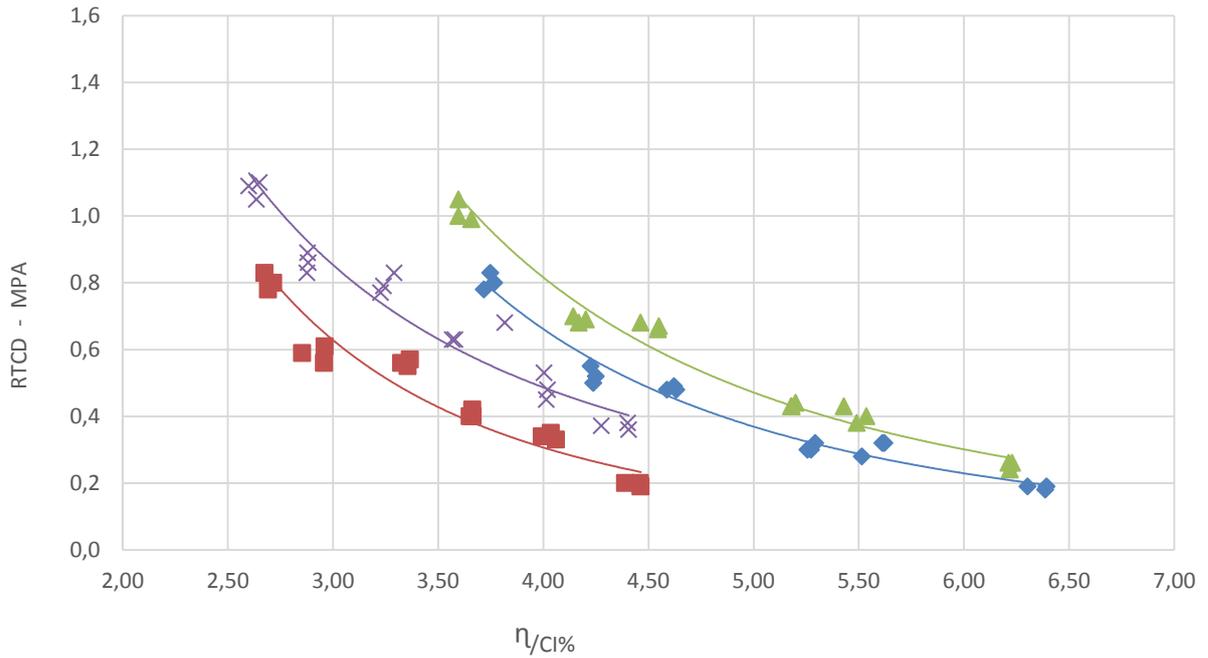
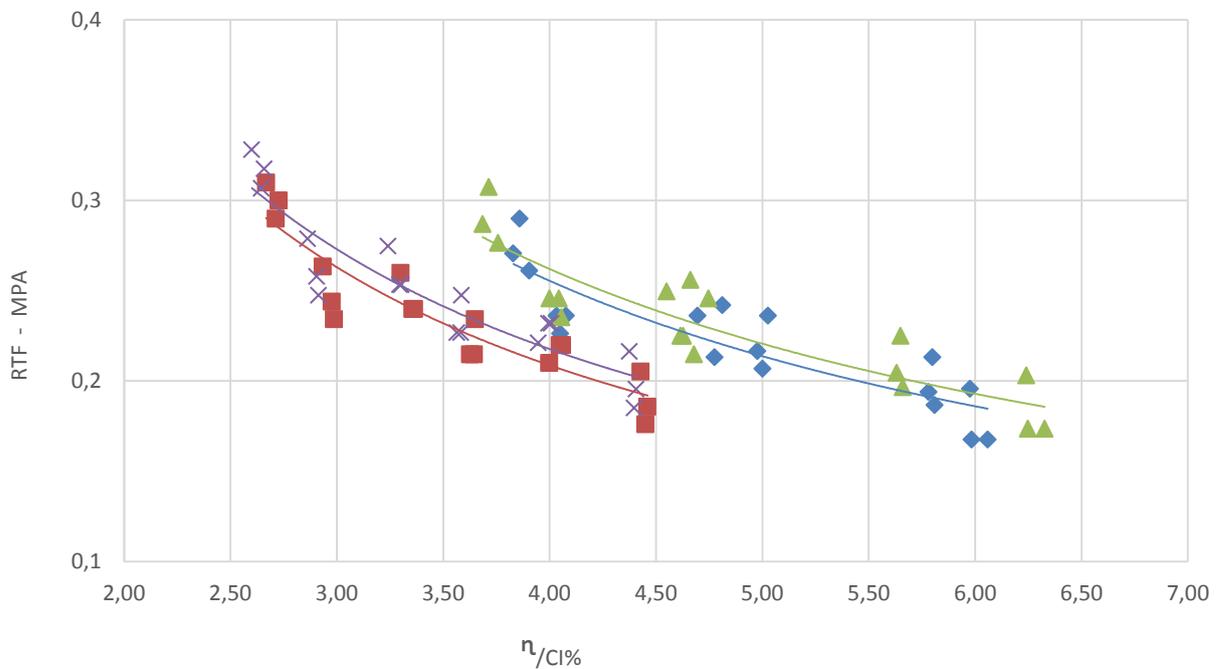


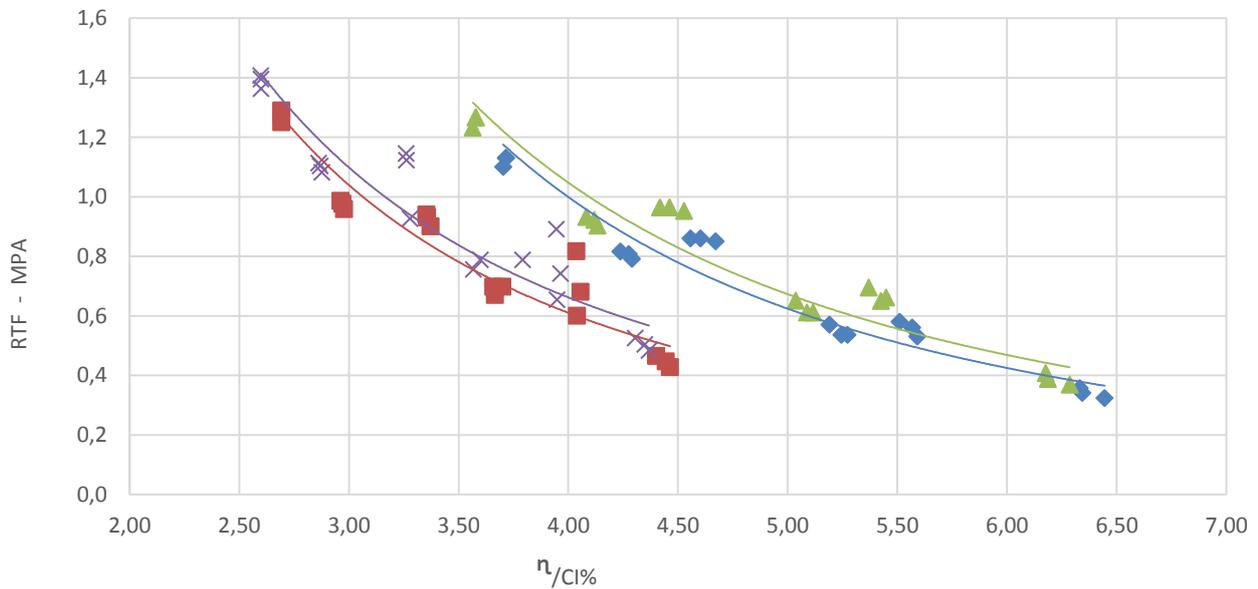
Figura 58 – Relação entre RTF e  $\eta/Ci\%$  para diferentes teores de cimento aos 7 dias



◆ FP4-3 e FP5-3 =  $0,8427(n/Ci\%)^{-1,018}$  ( $R^2=0,76$ )  
 (R<sup>2</sup>=0,80)  
 FP4-6 e FP5-6 =  $0,6555(n/Ci\%)^{-1,023}$  ( $R^2=0,85$ )  
 Fonte: Autor

▲ REF4-3 e REF4-6 =  $0,8173(n/Ci\%)^{-0,978}$   
 ✕ REF4-6 e REF5-6 =  $0,6621(n/Ci\%)^{-0,991}$

Figura 59 – Relação entre RTF e  $\eta/Ci\%$  para diferentes teores de cimento aos 91 dias



◆ FP4-3 e FP5-3 =  $18,611(n/Ci\%)^{-2,110}$  ( $R^2=0,94$ )  
 (R<sup>2</sup>=0,93)  
 FP4-6 e FP5-6 =  $7,9358(n/Ci\%)^{-1,851}$  ( $R^2=0,91$ )  
 Fonte: Autor

▲ REF4-3 e REF4-6 =  $16,395(n/Ci\%)^{-1,984}$   
 ✕ REF4-6 e REF5-6 =  $7,5910(n/Ci\%)^{-1,760}$

Figura 60 – Relação entre MR e  $\eta/C_{i\%}$  para diferentes teores de cimento aos 7 dias

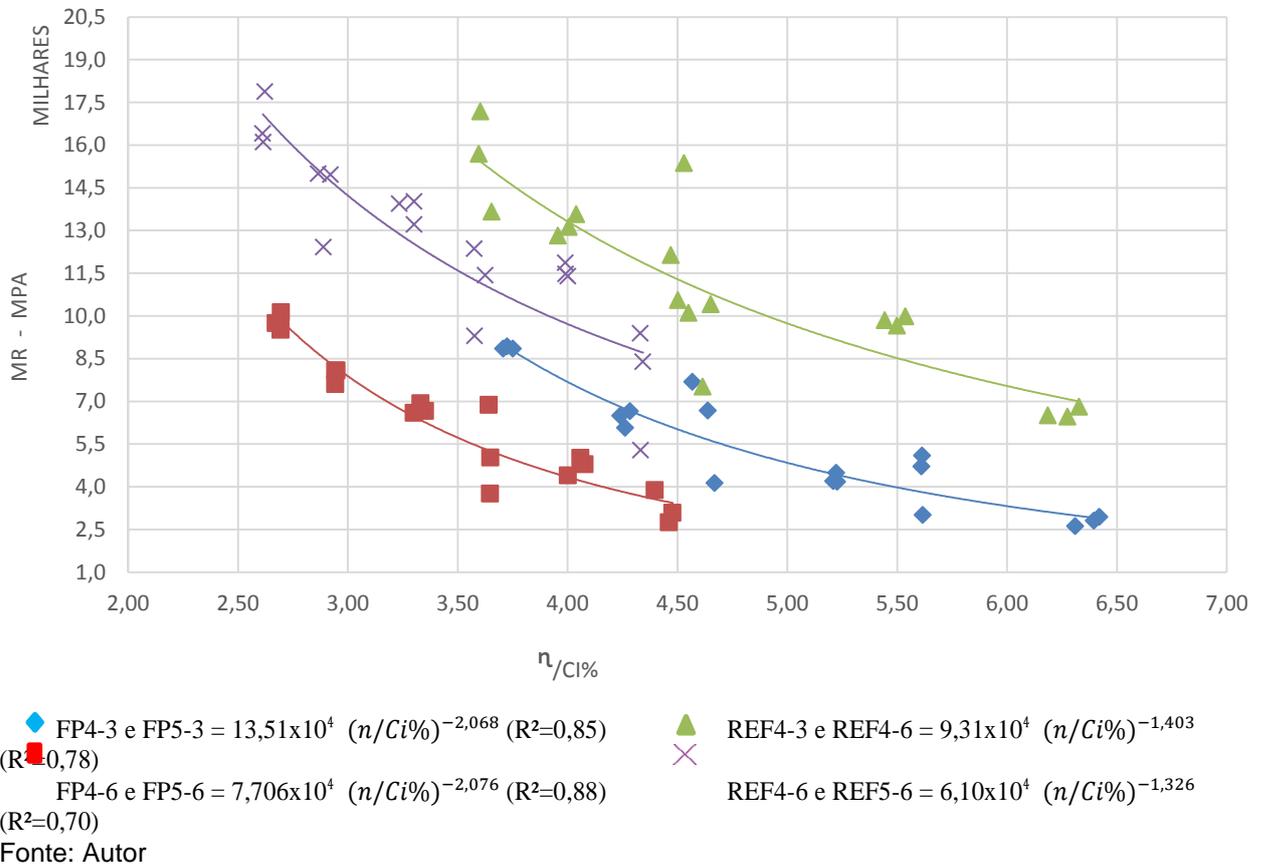
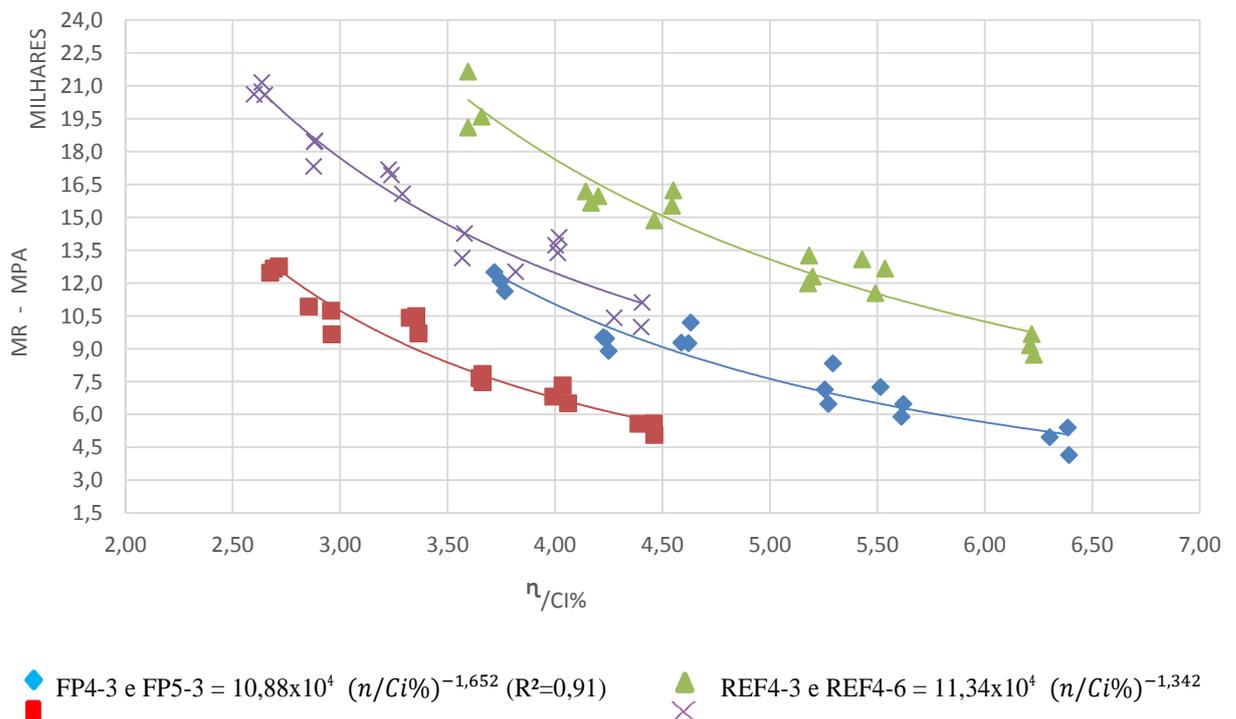


Figura 61 – Relação entre MR e  $\eta/C_{i\%}$  para diferentes teores de cimento aos 91 dias



(R<sup>2</sup>=0,94)

FP4-6 e FP5-6 =  $6,283 \times 10^4 (n/Ci\%)^{-1,609}$  (R<sup>2</sup>=0,93)

REF4-6 e REF5-6 =  $6,799 \times 10^4 (n/Ci\%)^{-1,220}$

(R<sup>2</sup>=0,92)

Fonte: Autor

#### 4.6 AVALIAÇÃO DAS MISTURAS

Após análise dos resultados alcançados pelo material fresado e pelo agregado natural ou de referência (REF), percebe-se que a utilização do fresado em substituição ao agregado natural pode ocorrer desde que sejam dosados corretamente os valores de material cimentante e verificada a densidade para suporte das solicitações do fluxo de veículos, pois, o mesmo apresentou valores de resistências e módulos compatíveis para seu uso em obras viárias.

Os valores de resistência dependem do grau de compactação e do teor de material cimentante. Assim, para uma resistência desejada, pode-se determinar a melhor forma de atingi-la a partir da compactação e do teor de cimento e da cal. Dessa forma, para teores de cimento e cal iguais, pode-se adquirir melhores resistências a partir da mudança do grau de compactação, possibilitando correções ao decorrer da obra, em locais onde ocorreram dosagens equivocadas do material cimentante, aumentando-se o grau de compactação para se atingir a resistência desejada. As misturas seguem os mesmos padrões descritos por Pasche (2016) e Silva (2018) de aumento linear com a adição de cimento, acréscimo exponencial com a redução da porosidade, e a existência de uma relação direta de sua resistência e rigidez com a relação  $\eta/C\%$ . É importante lembrar que os experimentos de tais pesquisadores utilizaram a adição de cimento CP V, sem incremento da cal.

A adição da cal proporcionou um ganho de resistência perceptível dentro do mesmo percentual de cimento, contudo deve-se adotar um grau de compactação adequado e uma correta adição desse material, quando ocorrer a liberação do tráfego em um período precoce de cura, pois aos 7 dias a cal participa moderadamente no acréscimo de resistência. A participação da cal no ganho de resistência ocorre para períodos mais longos. Isso se deve à ação da cal no refinamento do tamanho das partículas de hidróxido de cálcio, oriundas da hidratação do cimento, através da sílica amorfa proveniente das pozolanas e/ou escória, a qual reforça a estrutura cristalina do C-S-H (Hoppe (2002)). Para o período de 91 dias o ganho de resistência se mostrou 61% maior que os valores aos 7 dias. Assim obtendo valores compatíveis para seu uso em bases.

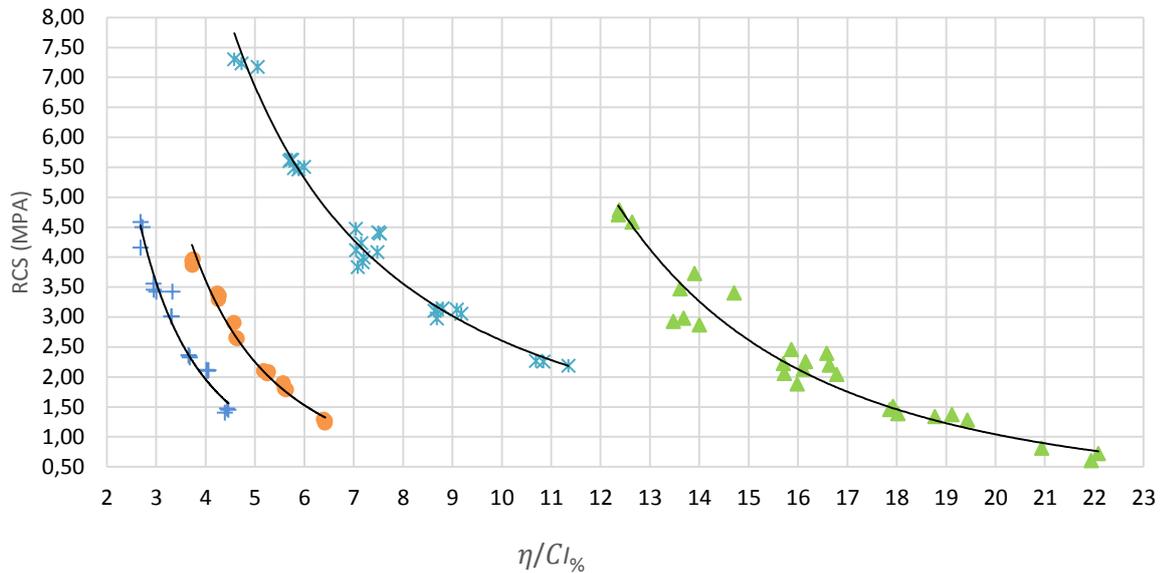
Ainda deve-se levar em consideração que camadas semirrígidas tendem a suportar as cargas do tráfego como placas de flexão. Dessa forma o módulo de resiliência é fator importante e deve ser considerado. De acordo com Balbo e Albuquerque (2013), a rigidez de camadas cimentadas e a preservação simultânea de resistência são benéficos ou vantajosas, em uma primeira análise. Assim o módulo deve ser levado em consideração no dimensionamento de camadas semirrígidas. Nos resultados alcançados o material fresado teve módulos inferiores aos valores encontrados para o material natural, mas coerentes para seu uso em obras viárias.

A partir desta análise, pode-se dizer que o uso recomendado pelos órgãos normalizadores, DNIT e DAER-RS a respeito da aplicação do material fresado em faixa de baixo fluxo de veículos e acostamentos é de certa forma conservador, pois tal material pode ser usado em substituição ao material natural em diversos tipos de obras ligadas à pavimentação, desde que seja realizado um controle tecnológico rígido, caracterizando o tráfego de veículos no local, material a ser usado, características físicas e químicas do RAP, tipo do agente cimentante, dosagem e tempo de cura necessário para a mistura. Por fim o controle do grau de compactação e da umidade são de suma importância para se conseguir as especificações técnicas desejadas para a camada a ser construída, pois estão diretamente ligados às características finais da base reciclada.

#### 4.7 COMPARATIVO ENTRE MISTURAS

As Figuras 63 a 65 demonstram as pesquisas realizadas por Pasche (2016) e Silva (2018) ambas para o período de cura de 28 dias, juntamente com os resultados alcançados nesta pesquisa para os traços (FP4-3 e FP5-3) e ainda (FP4-6 e FP 5-6) para a o período de cura de 91 dias. Os valores constantes nas curvas foram em função das resistências/rigidez alcançados nos ensaios realizados e da relação porosidade/teor de material cimentante ( $\eta/C_{i\%}$ ). As recomendações das especificações quanto à resistência final do cimento e reciclagem de pavimentos (DNIT-ES 167/2013) foram observadas. As curvas formadas e equações encontradas pelos pesquisadores foram apresentadas nas observações de cada Figura, assim como os teores de material cimentante de cada pesquisas.

Figura 62 – Relação entre RCS e  $\eta/Ci\%$  para diferentes teores de material cimentício



▲ PASCHE  $RCS = 1,5 \times 10^7 (n/Ci\%)^{0,34} \cdot 3,197$  ( $R^2 = 0,98$ )   
 ● FP4-3 e 5-3  $RCS = 68,28 (n/Ci\%)^{-2,120}$  ( $R^2 = 0,98$ )  
 ✕ SILVA  $RCS = 64,53 (n/Ci\%)^{-1,394}$  ( $R^2 = 0,98$ )   
 + FP4-6 e 5-6  $RCS = 35,43 (n/Ci\%)^{-2,088}$  ( $R^2 = 0,96$ )

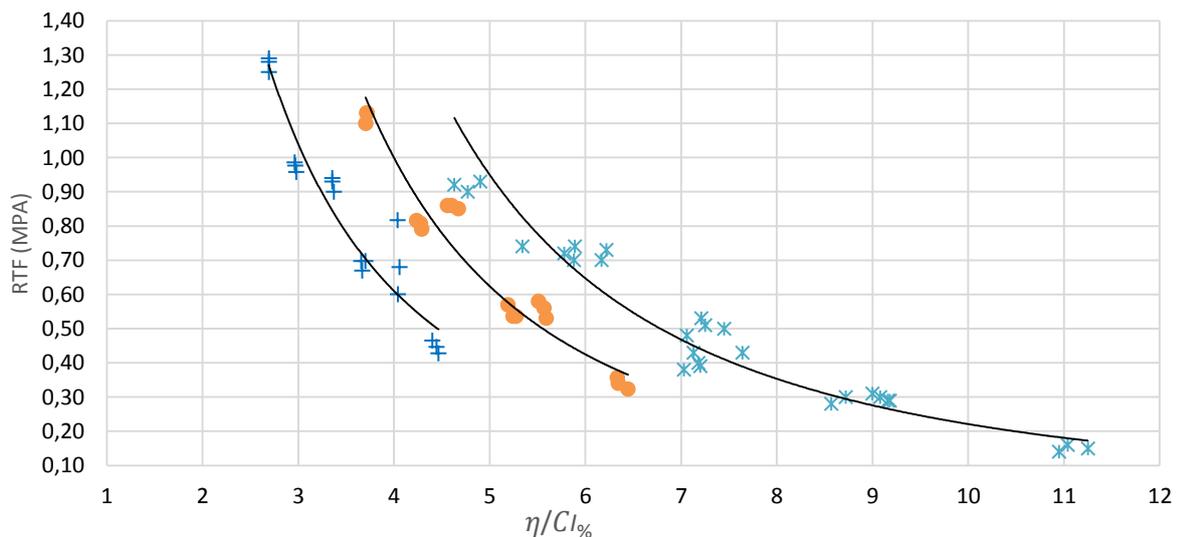
OBS:

- Pasche (2016) teor de cimento 3%, 5% e 7% de cimento CP V

- Silva (2018) teor de cimento 4%, 5% e 6% de cimento CP V

Fonte: Autor

Figura 63 – Relação entre RTF e  $\eta/Ci\%$  para diferentes teores de material cimentício



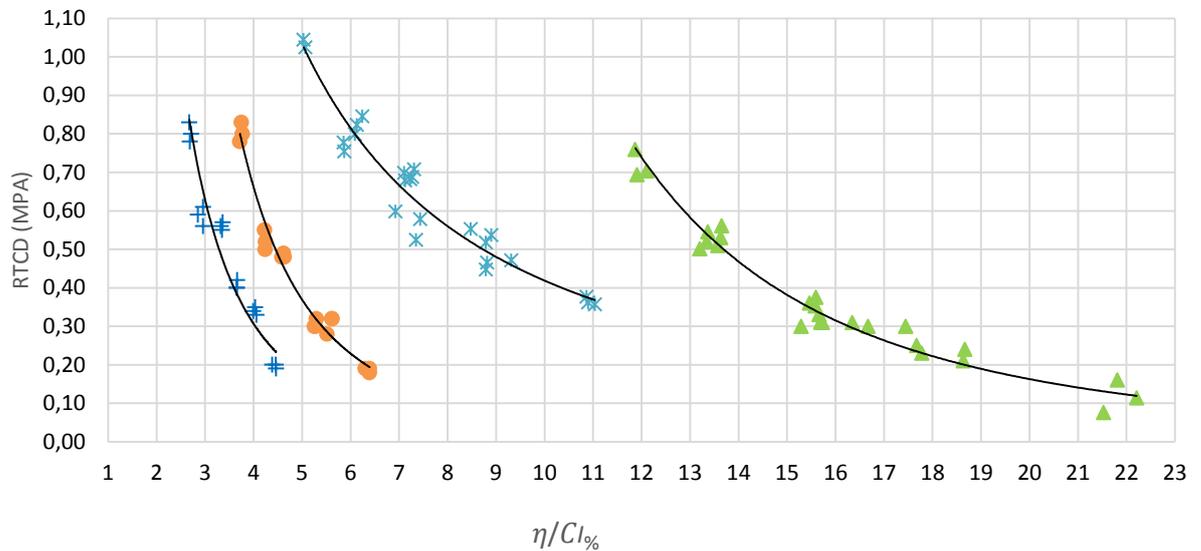
✕ SILVA  $RTF = 27,93 (n/Ci\%)^{-2,110}$  ( $R^2 = 0,94$ )  
 ● FP4-3 e 5-3  $RTF = 18,61 (n/Ci\%)^{-2,110}$  ( $R^2 = 0,94$ )  
 + FP4-6 e 5-6  $RTF = 7,94 (n/Ci\%)^{-1,851}$  ( $R^2 = 0,91$ )

OBS:

- Silva (2018) teor de cimento 4%, 5% e 6% de cimento CP V

Fonte: Autor

Figura 64 – Relação entre RTCD e  $\eta/Ci\%$  para diferentes teores de material cimentício



▲ PASCHE  $RTCD=3,72 \times 10^2 (n/Ci\%^{0,3935})^{-2,52}$  ( $R^2=0,97$ )    ● FP4-3 e 5-3  $RTCD=18,611 (n/Ci\%)^{-2,110}$  ( $R^2=0,94$ )

✱ SILVA  $RTCD=8,422(n/Ci\%)^{-1,303}$  ( $R^2=0,93$ )    + FP4-6 e 5-6  $RTCD=7,935 (n/Ci\%)^{-1,851}$  ( $R^2=0,91$ )

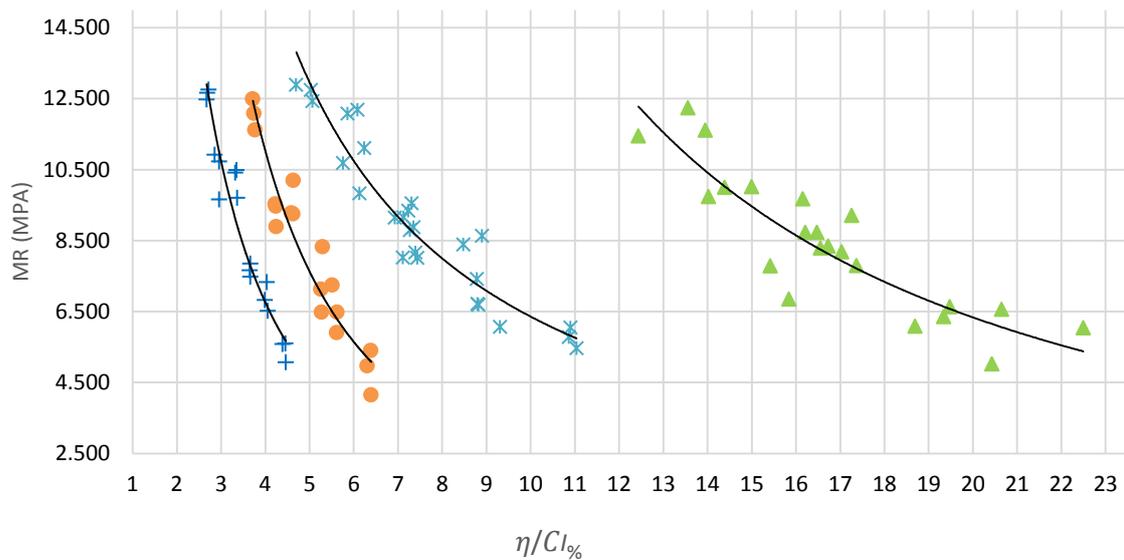
OBS:

- Pasche (2016) teor de cimento 3%, 5% e 7% de cimento CP V

- Silva (2018) teor de cimento 4%, 5% e 6% de cimento CP V

Fonte: Autor

Figura 65 – Relação entre MR e  $\eta/Ci\%$  para diferentes teores de material cimentício



▲ PASCHE  $MR = 0,412 \times 10^6 (n/Ci\%^{0,345})^{-1,40}$  ( $R^2=0,78$ )

● FP4-3 e 5-3  $RTCD=10,88 \times 10^4 (n/Ci\%)^{-1,652}$  ( $R^2=0,91$ )

\* SILVA  $MR = 6,79 \times 10^4 (n/Ci\%)^{-1,028}$  ( $R^2=0,90$ ) + FP4-6 e 5-6 RTCD =  $6,28 \times 10^4 (n/Ci\%)^{-1,609}$   
 ( $R^2=0,93$ )

OBS:

- Pasche (2016) teor de cimento 3%, 5% e 7% de cimento CP V

- Silva (2018) teor de cimento 4%, 5% e 6% de cimento CP V

Fonte: Autor

Os resultados alcançados nas pesquisas apresentaram elevado grau de precisão, desta forma evidência a relação entre resistência/rigidez com a porosidade/teor volumétrico de cimento. Outro fato foi que para pesquisa de Silva (2018) não se fez necessário o ajuste para  $\eta/Ci\%$  em forma de potência como ocorreu na pesquisa de Pasche (2016), o qual realizou-o para compatibilizar melhor as taxas de variação. Tal ajuste pode ter ocorrido devido as características do RAP utilizado, como granulometria e teor de betume. Pois, como mencionado anteriormente melhores resistência/rigidez podem ser alcançadas com melhores ligações entre os materiais constituintes da mistura (RAP).

A relação existente de  $\eta/Ci\%$  pode ser evidenciada através de uma análise dos resultados. Independentemente do ensaio realizado a relação demonstrou um excelente ajuste das curvas. Desta forma os modelos obtidos podem ser usados por projetista no emprego em obras de pavimentação, de posse do fator porosidade/teor volumétrico de cimentício, o mesmo pode adotar adequadamente a quantidade de cimento e a energia de compactação assim possibilitando uma mistura que cumpra características quanto a resistência/rigidez necessárias para execução do projeto ou de menor custo de execução.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais a respeito dos resultados alcançados. Ainda são sugeridas pesquisas futuras a respeito da utilização do material fresado em substituição ao material natural para novas obras viárias.

### 5.1 ANÁLISE DO MATERIAL FRESADO X MATERIAL NATURAL

A partir da análise do desempenho do material fresado em substituição ao agregado natural, realizada através de comparações dos valores alcançados nos ensaios realizados, torna-se perceptível a boa aceitação do uso do RAP em substituição ao agregado natural, devido à semelhança dos resultados alcançados de resistência e rigidez das misturas.

O material reciclado apresentou bom desempenho na aquisição de resistência e rigidez aos 91 dias, e moderado em idade inicial (7 dias), sendo neste último necessário o cuidado com o teor de material cimentante utilizado, o qual deve ser adequado ao período de cura ou a liberação do tráfego sobre a via. Outro fator determinante no uso do RAP em obras viárias é a granulometria adotada, pois o uso de tal material está ligado ao seu grau de compactação. Dessa forma a umidade utilizada deve satisfazer a necessidade de hidratação do agente cimentante e promover o melhor entrosamento dos agregados.

Os manuais IECA (2013), ARRA, (2001) e Austroads (2002), sugerem ensaios de caracterização e controle das características do RAP quanto granulometria e resistências mínimas. Com o devido controle tecnológico, o RAP possui aplicabilidade em diversos ramos de obras rodoviárias. As considerações e recomendações do DNIT para a utilização do RAP em obras de baixo volume de tráfego são válidas quando o controle tecnológico não se faz rígido. Com a devida dosagem, granulometria e compactação o RAP se comporta muito semelhante ao agregado natural. Contudo ensaios de campo com a aplicação do RAP por um período mais longo, com ação do tráfego de veículos e participação dos agentes climáticos devem ser realizados, para se avaliar a durabilidade e o efeito da fadiga devido o fluxo de veículos sobre o pavimento.

## 5.2 MATERIAIS CIMENTICIOS

A adição de cimento e da cal, mesmo que em pequenos percentuais, possui influência sobre a resistência e rigidez das misturas, independente da densidade adotada. A adição da cal provocou ganhos de resistência que podem ser evidenciados com a variação do teor da cal em 3% para um mesmo teor de cimento. O percentual de cimento presente na mistura provocou ganhos superiores ao da cal, os quais já eram esperados conforme a revisão bibliográfica. O uso do cimento CP IV em obras rodoviárias deve ser compatível com o tempo de cura disponível para a liberação do tráfego, pois foi verificado que em densidades menores seu desempenho é moderado. Ainda, como mostra a pesquisa, ocorreu ganho linear de resistências e módulos devido à presença do cimento e da cal.

Por fim, a utilização de cimento CP-IV e da cal deve ser em quantidades coerentes com o tempo de cura e liberação do tráfego, aumentando os teores conforme a necessidade de antecipação da liberação da via ou ainda utilizando percentuais mais baixos, mas, com o aumento da compactação do material. Assim obtendo-se melhores características do produto final da mistura devido ao entrosamento entre os agregados. Conforme descrito por Paiva e Oliveira (2010), a influência da umidade ótima está ligada ao grau de compactação e hidratação do material cimentante. Assim, o cuidado com a umidade na elaboração do projeto e na execução da obra deve ser rígido, devido à importância exercida pela mesma, na compactação e hidratação do agente cimentante.

## 5.3 POROSIDADE

A relação existente entre resistência com a diminuição da porosidade pode ser vista nos traços utilizados onde ocorrem acréscimos de resistência quando a densidade aumenta. Como os valores de porosidade são variáveis dependendo dos percentuais de cimento e cal adotados, tem-se as médias de porosidade em percentuais de 29,66%, 25,75% e 21,85% para as densidades de 1,8g/cm<sup>3</sup>, 1,9 g/cm<sup>3</sup> e 2,0g/cm<sup>3</sup>. A variação dentro da mesma densidade devido ao acréscimo de cimento e cal não provoca uma grande mudança de porosidade.

Pode-se perceber através dos ensaios que o aumento do grau de compactação provoca um crescimento exponencial em relação a RCS, RTF, RTCD. Já o MR possui características de uma reta linear como constatado por outros

pesquisadores. A união que ocorre devido à granulometria correta (formação do esqueleto pétreo), juntamente com a adição de materiais cimentícios, provoca grande melhoria na ligação entre as partículas constituintes da mistura. A densidade criada através da compactação melhora ainda mais essa união evidenciando que a mesma é um fator importantíssimo para o ganho de resistência. Assim é perceptível a necessidade de controle da umidade adotada, já que está atua na melhoria do entrosamento do agregado, funcionando como lubrificante na compactação e, ao mesmo tempo, possibilitando a hidratação do agente cimentante existente na mistura.

#### 5.4 POROSIDADE E MATERIAIS CIMENTICIOS

Pode ser evidenciada a relação existente entre  $\eta/Ci\%$  que atua sobre a resistência e a rigidez da mistura. Tal relação pode ser usada para se determinar valores desejados de resistência para obras viárias. Frente às observações dos valores encontrados, pode-se determinar o  $\eta/Ci\%$  e assim se ter um teor de material cimentício e grau de compactação para a uma resistência desejada. Nos gráficos, os valores dependem da compactação, teor de cimento e de cal adotados. Diferentemente dos valores encontrados quando do uso exclusivo de cimento na amostra, a cal participa na porosidade e no percentual de ganho de resistência. Nos traços de 4% cimento e 3% de cal, quando variado o percentual da cal para 6% e mantido o valor do percentual de cimento, os valores de  $\eta/Ci\%$  são variados, contudo é observado ganho de resistência devido ao incremento da cal, mesmo que em pequenos percentuais.

Assim a dosagem pode ocorrer a partir da resistência desejada e dos percentuais de material cimentante a serem usados (economia no traço), contudo deve ocorrer a verificação do período de cura disponível para tal obra, observando as características impostas pelo material cimentante. Outro uso plausível da pesquisa é para sanar imprevistos que possam ocorrer durante a execução da obra, os quais provoquem a diminuição do grau de compactação ou dosagem incorreta do material cimentante. Através dos dados alcançados, pode-se determinar se a nova compactação ou dosagem existente no local tem o mínimo desejado para o suporte ao fluxo de veículos da rodovia.

## 5.5 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

No desenvolvimento deste trabalho pôde-se observar a aplicabilidade do material fresado e ainda a possibilidade de desenvolvimento de outras pesquisas sobre este assunto:

- a) estabilização do RAP em outras proporções de material cimentício e densidades diferentes;
- b) análise da estabilidade do RAP com uso somente da cal hidratada dolomítica em diferentes teores e densidades;
- c) aplicação em campo do RAP com verificações durante um período longo com a influência do tráfego de veículo;
- d) verificação em campo do desempenho à fissuração dos materiais estudados com diferentes relações de  $\eta/C\%$ ;
- e) quantificação dos custos da aplicação do RAP em substituição ao agregado natural levando em consideração a vida útil da via;
- f) coleta de dados para diferentes períodos de cura (3, 14, 28 e 60 dias) variando os tipos de cimento e relacionando o  $\eta/C\%$  ; e
- g) realização de ensaios de fadiga para verificação do comportamento do RAP ao fluxo de veículos repetitivos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANHA, A. L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5732: Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1999, 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazio**. Rio de Janeiro, 2006. 18p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2003. 15 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175: Cal – Hidratada para argamassas - Especificações**. Rio de Janeiro, 2003. 4p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935: Define os termos relativos a agregados empregados em concreto e argamassa de cimento Portland**. Rio de Janeiro, 2005. 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578: Cimento Portland composto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2013, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento**. Rio de Janeiro, 2013. 7p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142: Concreto – Determinação da Resistência à Tração em Corpos de Prova Prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12261: Dosagem de brita graduada tratada com cimento - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2013. 7p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15619: Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas**. Rio de Janeiro, 2012. 7 p.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Basic Asphalt Recycling Manual**. Annapolis, Maryland, 2001.

ATTOH-OKINE, N. O. **Lime Treatment of laterite soils and gravels – revisited.** Construction and Building Material, v.9, n.5, p.283-287. 1995.

AUSTROADS. **Mix design for stabilised pavement materials: Austroads Publication APT16.** Sydney, 43p. 2002.

\_\_\_\_\_. **Fatigue performance of cemented materials under accelerated loading: influence of vertical loading on the performance of unbound and cemented materials.** Sydney, 2008. AP-T102/08.

BALBO, J. T. **Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura.** Transportes, Rio de Janeiro, v. 14, p. 45-53, 2006.

BALBO, J. T. **Estudos das propriedades Mecânicas das misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semirrígidos.** 1993. 181 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo, ed. Oficina de textos, 2007, 558 p.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** ABEDA, Petrobras. Rio de Janeiro, 2008, 116 p.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** ABEDA, Petrobrás. Rio de Janeiro, 2010, 504 p.

CERVO, T. C. **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação.** 2004. 242p. Tese de Doutorado (engenhariacivil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. Pesquisa CNT de rodovias anos 2006, 2013, 2015 e 2017: **relatório gerencial.** Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução N°307. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Publicada no DOU nº 136, p. 95-96, 2002.

CONSOLI, N. C., DALLA ROSA, A., SALDANHA, R. B. **Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures.** J. Materials in Civil Engineering, 10.1061/ (ASCE) MT.1943-5533.0000186, p. 432–440, 2001.

CONSOLI, N. C.; LÓPEZ JUNIOR, L. S.; HEINECK, K. S. **Key parameters for the strength control of lime stabilized soils.** Journal of Materials in Civil Engineering. V. 21, p. 210-216, 2008.

CONSOLI, N.C.; FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; HEINECK, K. S. **Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE, v. 135, n.9, p. 1347-1353, 2009a.

CONSOLI, N.C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key parameters for Strength control of artificially cemented soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE, v.133, n.2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N.C.; LÓPEZ JUNIOR, L.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. **Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils.** Proceedings of ICE/UK – Geotechnical Engineering, v. 162, p. 111-118, 2009b.

CRUZ, R. C. **Análise e Controle de Resistência de uma Areia Artificialmente Cimentada.** 2008. Qualificação de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 83p.

D'AVILA, V. E. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento: comportamento à flexão de misturas contendo BGTC e fresado asfáltico.** 2015. 82p. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2015.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal.** 2009. 200 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2009.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos.** 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – UnB, Brasília.

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

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DAER/RS- **Especificações gerais.** Rio de Janeiro, 1998, 421 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP ET-DE-P00/035:** reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita. São Paulo, 2006, 22 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP ET-DEP00/009/2005:** sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento - BGTC. São Paulo, 2005, 24 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR ES-P 33/05:** Pavimentação: Reciclagem de pavimento in situ com adição de cimento. Curitiba, 2005, 13p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ES 180/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples.** Rio de Janeiro, 1994, 11 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 035/98: **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro: IPR, 1998, 6 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 036/94: **Solos – Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com o emprego do balão de borracha.** Rio de Janeiro, 1994, 5 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 049/94: **Solos - Determinação do “índice de suporte Califórnia” utilizando amostras não trabalhadas.** Rio de Janeiro, 1994, 14 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 053/94: **Misturas betuminosas – percentagem de betume.** Rio de Janeiro, 1994, 5 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia.** Rio de Janeiro, 1997, 10 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 083/98: **Agregados – análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998, 5 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 086/94: **Agregado – determinação do índice de forma.** Rio de Janeiro, 1994, 5 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 089/94: **Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio.** Rio de Janeiro, 1994, 6 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 195/97: **Agregados- determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1997, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Manual de Pavimentação. 3º ed. Rio de Janeiro, 2006, 274 p.

\_\_\_\_\_. DNIT-ES 031/2006: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006, 14 p.

\_\_\_\_\_. DNIT-ES 141/10: **Pavimentação asfáltica – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010, 9 p.

\_\_\_\_\_. DNIT-ES 167/13: **Pavimentação – reciclagem profunda de pavimentos in situ com adição de cimento Portland – especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2013<sup>a</sup>, 11 p.

\_\_\_\_\_. DNIT-ME 134/10: **Pavimentação - Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2005, 11 p.

\_\_\_\_\_. DNIT-ME 136/10: **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010, 6p.

\_\_\_\_\_. DNIT-ME 164/13: **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2013, 7 p.

CHAVES, F.J. **Caracterização Geotécnica de Solos da Formação Barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação em Obras Rodoviárias**. Tesede mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2000.

EADES, J. L.; GRIM, R. A. **Quicktest to determine lime requirements for lime stabilization**. Highway Reserarch Record, Washington, D. C., n. 139, p.61-72. 1966.

ELLIS, S. **Experience in the UK of recycling with cement for the structural maintenance of pavements**. In: SEMINAR ON ROAD PAVEMENT RECYCLING – Proceedings... Polônia, 2002, 8p.

ELY, V. **Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado**. 2014. 59p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2014.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland: Definição das bases para um Método de Dosagem**. 2015. 162p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2015.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 146p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2005.

FULLER, W. B., THOMPSON, S. E. **The laws of proportioning concrete**. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. New York, p. 63-147, 1907.

GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens**. Boletim nº1. São Paulo: ABPC, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

GUSMÃO, C. B. **Evolução temporal da resistência mecânica em laboratório, de misturas simulando a reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento portland**. 2008. 167 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – UNICAMP, Campinas.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. **Lime Fixation in clayey soil**. Highway Research Board, Washington, D. C., n. 262, p.20-32. 1960.

HOPPE, J. F. **Efeito da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**.

2002. 204. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria - RS, 2002.

HOPPE, J. F. **Sistema cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** 2008. 318. Tese de Doutorado (Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2008.

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, H. Y., **Pavement Analysis and Design.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 805p.

HUANG, B., SHU, X., LI, G. Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. **ScienceDirect – Cement and Concrete Research.** v. 35. p2008-2013. 2005.

HVEEM, F. N., **Pavement deflection and fatigue failures.** IN: Annual Meeting – 1955. HASS, R., **Modern Pavement Management,** Florida, 1994.

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. **Reciclado de firmes in situ concemento: Guías técnicas.** Madrid, 2013, 12p.

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.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soli Stabilization – Principles and practice.** Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

JASIENSKI, A.; RENS, L. **In situ recycling with cement: the Belgian experience .** In: SEMINAR ON ROAD PAVEMENT RECYCLING – Proceedings... Polônia, 7 p. 2002.

JOHANN, A. D. R. **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura.** 2013. 273. Tese de Doutorado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2013.

KLEINERT, T., **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de uma metodologia de dosagem.** 2016. 177p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2016.

LARNACH, W. J. **Relationship between dry density/cement ratio and strength of soil-cement mixtures.** *Civil Engineering and Public Works Reviews.* London: Lomax Erskine and Co., v.55, n.648, p. 903-905, 1960.

LELIS, Thatiana A. **Influência da energia de compactação nas relações entre o módulo resiliente, CBR e resistência à compressão não confinada de solos da Zona da Mata norte de Minas Gerais.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 123 p. Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa, abril de 2004.

LÓPEZ JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada.** 2007. 147p. Dissertação de Mestrado (engenharia civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2007.

LÓPEZ, M. A. C. **Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga de quarto pontos.** Dissertação de Mestrado (engenharia civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2016.

MASSAD, Façal. Obras de terra: **Curso Básico de Geotecnia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

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.

CANCIAN, M. A. **Influência do teor de umidade, porosidade e do tempo de aplicação na mistura solo cimento para pavimento rodoviário de uma solo da bacia do Paraná.** Dissertação de Mestrado (engenharia civil) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina-PR, 2013.

MINGUELA, J. D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ concemento.** 2011. 572 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – UBU, Burgos.

MIRA P., PAPADAKIS V. G., TSIMAS S. **Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete.** CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, v. 32, p. 683-689. USA: Pergamon Press, 2002.

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.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** 2010. 299p. Tese de Doutorado da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2013.

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. 5 p.

OLIVEIRA, P. C. A. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis**. 2003. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – UNICAMP, Campinas.

OLIVEIRA, P. C. A.; SANT'ANNA, F. M. G.; SOUZA, F. S. V. **Pavement rehabilitation through recycling with the addition of Portland cement on highway SP-351**. In: 2005 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT RECYCLING – Anais... São Paulo, 2005.15 p.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. de. **Impacto da atividade do CAP e do percentual de asfalto fresado na resistência à fadiga de uma base reciclada com cimento**. In: 21ª ENCONTRO DO ASFALTO, 2014, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2014.

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

PASCHE, E. **Estudo da rigidez e resistência de uma mistura de material fresado asfáltico e pó-de-pedra com a adição de cimento**. 2016. 170p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2016.

PINTO, S., **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 478 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

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. 164 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria - RS, 2014.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – PCA. **Design of Full-Depth Reclamation with Portland Cement (FDR-PC) Pavements**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax, Nova Scotia, Canada, 2010.12 p.

\_\_\_\_\_. **PCA: Full-Depth Reclamation using Portland Cement: A Study of Long-Term Performance**. Illinois, E.U.A, 2007.60 p.

\_\_\_\_\_. **PCA: Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement**. Illinois, E.U.A., 2005.

ROGERS, C. D. F., GLENDINNING, S., ROFF, T. E. J. **Lime modification of clay soils for construction expediency**. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v. 125, p.242-249, 1997.

SALVADOR, R.P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2013. 201p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2013.

SEVERI, A. A., BALBO, J.T. RODOLFO, P.R., SESTINI, V. M., PRIETO, V. **Verificação à fadiga de Revestimentos Asfálticos e Bases Cimentadas** “Programa Pavimentos Asfálticos v. 1.0” Der. 1999. 27 p.

SILVA, M. R. **Determinação de parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas de material fresado estabilizado granulometricamente e quimicamente para emprego em pavimentação**. 2018. 139p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal De Santa Maria - UFSM. Santa Maria - RS, 2018.

SOUSA PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo, SP, Brasil.2000.

SUZUKI, C. Y. **Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada)**.1992. Páginas. Tese de Doutorado (Engenharia Civil) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP.São Paulo, 1992.

TAHA, R. *et al.* **Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases**. Journal of materials in civil engineering, v. 14, n.3, p.239-245, 2002, ISSN 0899-1561/2002/3-239-245.

TALBOT A. M., RICHARD, F. E.**The strength of concrete: its relation to the cement, aggregates, and water**. Bulletin, EngineeringExperimentStation. Urbana, Illinois, USA, 1923.

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.ASCE, v.92, p.67-92.1966.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. **Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC-303**. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS & CONCESSÕES – Anais... Foz do Iguaçu, 2011. 15 p.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. **Desempenho da reciclagem com adição de cimento da rodovia SC-150**. In: 42ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – Anais... Gramado, 2013. 13 p.

VAN IMPE, W. F. **Soilimprovement**. Techniques and their evolution. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 1989. 125p.

VOROBIEFF, G; WILMOT, T. **Australian experience on subgrade stabilization and pavement recycling**. In: 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de

firμες concemento, 2001, Salamanca, España. Anais... Salamanca: IECA, p. 104-132, 2001.

WIRTGEN. **Reciclagem a frio: tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen.** Windhagen, Alemanha, 2012.370 p.

YANG, Y. H.; WU.Y. B.; **Mix Design for Full-Depth Reclaimed Asphalt Pavement with Cement as Stabilizer.**Geo-Hubei 2014, International Conference on Sustainable Civil Infrastructure, 2014, 8 p.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design.** New York: John Wiley & Sons Inc., ed. 2, 1975. 711p.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A - RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RCS: MISTURA FP

Cimento (%)	Cal (%)	Cura (dias)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	$\gamma_d$ medido (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	$\eta$ (%)	Ci (%)	$\eta$ /Ci%	RCS (Mpa)			
4,00%	3,00%	7	1,8	4,93%	100,2	196,5	1549,49	2920	1,79	99,53%	30,40	4,74	6,41	0,69			
				5,02%	100,1	196,2	1544,04	2910	1,79	99,45%	30,40	4,74	6,41	0,69			
				5,06%	100,1	198,5	1562,14	2940	1,79	99,27%	30,40	4,73	6,42	0,74			
			1,9	5,05%	100,1	197,3	1552,69	3110	1,90	100,10%	26,53	5,04	5,27	1,01			
				5,10%	100,3	196,5	1552,58	3090	1,89	99,41%	26,53	5,01	5,30	0,95			
				4,97%	100,4	197,2	1561,22	3110	1,89	99,63%	26,53	5,01	5,30	1,03			
			2	4,96%	100,2	198,5	1565,26	3320	2,02	100,79%	22,66	5,33	4,25	1,35			
				4,98%	100,4	198,2	1569,14	3290	1,99	99,61%	22,66	5,27	4,30	1,51			
				5,02%	100,2	197,3	1555,80	3300	2,01	100,73%	22,66	5,33	4,25	1,56			
			91	1,8	4,93%	100,1	198,2	1559,78	2950	1,80	99,89%	30,40	4,76	6,39	1,29		
					4,98%	100,0	197,6	1551,95	2920	1,79	99,32%	30,40	4,73	6,42	1,26		
					5,01%	100,3	196,8	1554,96	2930	1,79	99,44%	30,40	4,74	6,41	1,23		
		1,9		4,98%	100,1	198,3	1560,56	3180	1,94	101,91%	26,53	5,13	5,18	2,10			
				4,95%	100,3	199,1	1573,13	3150	1,90	100,17%	26,53	5,04	5,27	2,08			
				5,12%	100,5	198,3	1573,06	3160	1,91	100,31%	26,53	5,05	5,25	2,05			
		2		5,09%	100,1	196,7	1547,97	3290	2,02	100,86%	22,66	5,35	4,24	3,39			
				5,08%	100,2	197,2	1555,01	3280	2,00	100,11%	22,66	5,31	4,27	3,35			
				5,00%	100,4	198,1	1568,35	3320	2,01	100,55%	22,66	5,32	4,26	3,29			
		4,00%		6,00%	7	1,8	4,98%	100,1	199,2	1567,65	2950	1,79	99,34%	30,42	6,81	4,47	0,84
							4,96%	100,1	199,1	1566,86	3000	1,82	101,09%	30,42	6,93	4,39	0,82
							4,93%	100,4	196,2	1553,31	2930	1,79	99,63%	30,42	6,82	4,46	0,86
			1,9			5,02%	100,2	198,2	1562,90	3130	1,90	100,11%	26,55	7,24	3,67	1,23	
						5,06%	100,1	198,8	1564,50	3100	1,88	99,01%	26,55	7,17	3,70	1,22	
						5,10%	100,0	197,9	1554,31	3080	1,88	98,98%	26,55	7,17	3,70	1,21	
2	4,98%		100,1			198,3	1560,56	3300	2,01	100,47%	22,69	7,65	2,97	1,84			
	4,96%		100,3			195,3	1543,10	3250	2,00	100,08%	22,69	7,62	2,98	1,77			
	5,06%		100,4			197,5	1563,60	3290	2,00	99,88%	22,69	7,61	2,98	1,59			
91	1,8		4,98%			100,2	199,2	1570,78	2980	1,80	100,15%	30,42	6,86	4,43	1,47		
			5,01%			100,2	198,5	1565,26	2950	1,79	99,46%	30,42	6,82	4,46	1,45		
			5,06%			100,3	196,8	1554,96	2980	1,82	101,08%	30,42	6,93	4,39	1,40		
	1,9		5,10%		100,3	198,5	1568,39	3150	1,91	100,32%	26,55	7,27	3,65	2,36			
			4,98%		100,3	196,7	1554,16	3110	1,90	100,07%	26,55	7,24	3,67	2,35			
			5,05%		100,4	197,5	1563,60	3120	1,89	99,72%	26,55	7,22	3,68	2,32			
	2		4,96%		100,2	198,5	1565,26	3330	2,02	101,10%	22,69	7,70	2,95	3,45			
			5,10%		100,3	199,1	1573,13	3290	1,98	99,24%	22,69	7,57	3,00	3,42			
			4,98%		100,2	197,5	1557,38	3320	2,03	101,28%	22,69	7,71	2,94	3,55			
5,00%	3,00%		7		1,8	4,97%	100,2	199,2	1570,78	2960	1,79	99,49%	30,39	5,41	5,62	1,17	
						4,93%	100,1	198,5	1562,14	2960	1,80	100,08%	30,39	5,43	5,59	1,18	
						5,10%	100,3	199,3	1574,71	2970	1,79	99,44%	30,39	5,41	5,62	1,37	
					1,9	5,12%	100,2	197,5	1557,38	3120	1,90	100,04%	26,52	5,75	4,62	1,78	
						4,98%	100,4	196,3	1554,10	3150	1,93	101,37%	26,52	5,81	4,56	1,81	

5,00%	6,00%	91	2	4,96%	100,1	197,5	1554,27	3100	1,90	99,77%	26,52	5,72	4,64	1,55			
				5,00%	100,3	198,3	1566,81	3300	2,00	100,04%	22,66	6,04	3,75	2,55			
				5,03%	100,2	198,3	1563,68	3310	2,01	100,52%	22,66	6,07	3,73	2,43			
				91	1,8	5,05%	100,1	199,2	1567,65	2950	1,79	99,26%	30,39	5,40	5,63	1,78	
						5,00%	100,2	198,5	1565,26	2960	1,80	99,81%	30,39	5,42	5,60	1,80	
						4,96%	100,3	197,5	1560,49	2970	1,81	100,49%	30,39	5,46	5,57	1,89	
						1,9	4,93%	100,2	199,5	1573,15	3150	1,90	100,19%	26,52	5,74	4,62	2,65
							4,97%	100,4	197,5	1563,60	3120	1,90	99,80%	26,52	5,72	4,63	2,64
							5,00%	100,3	198,3	1566,81	3170	1,92	101,16%	26,52	5,80	4,57	2,90
						2	5,03%	100,2	196,3	1547,91	3280	2,01	100,62%	22,66	6,08	3,73	3,86
							5,10%	100,1	195,8	1540,89	3270	2,01	100,70%	22,66	6,09	3,72	3,93
					5,05%		100,3	197,2	1558,12	3290	2,00	100,24%	22,66	6,06	3,74	3,96	
			91	1,8	4,99%	100,1	196,5	1546,40	2950	1,81	100,69%	30,41	7,57	4,02	1,48		
						5,02%	100,2	197,3	1555,80	2960	1,81	100,39%	30,41	7,55	4,03	1,47	
						5,08%	100,3	196,9	1555,75	2980	1,82	101,01%	30,41	7,61	4,00	1,51	
					1,9	5,10%	100,4	195,5	1547,77	3100	1,90	100,04%	26,55	7,95	3,34	2,07	
						4,95%	100,1	198,2	1559,78	3120	1,90	100,07%	26,55	7,94	3,34	2,25	
						5,11%	100,2	197,5	1557,38	3130	1,91	100,37%	26,55	7,98	3,33	2,18	
					2	4,96%	100,3	196,8	1554,96	3320	2,03	101,46%	22,68	8,48	2,68	2,97	
						4,98%	100,4	197,5	1563,60	3330	2,02	101,18%	22,68	8,46	2,68	3,06	
						4,96%	100,1	199,2	1567,65	3290	1,99	99,73%	22,68	8,33	2,72	2,90	
					1,8	5,08%	100,2	197,5	1557,38	2950	1,80	99,89%	30,41	7,52	4,04	2,10	
				5,05%		100,3	198,3	1566,81	2960	1,79	99,65%	30,41	7,50	4,05	2,11		
				5,00%		100,4	197,5	1563,60	2980	1,81	100,59%	30,41	7,57	4,02	2,11		
				1,9	4,98%	100,5	198,2	1572,27	3180	1,92	101,15%	26,55	8,03	3,31	3,00		
					4,96%	100,3	198,3	1566,81	3170	1,92	101,20%	26,55	8,03	3,30	3,01		
					4,95%	100,3	198,3	1566,81	3150	1,91	100,58%	26,55	7,98	3,33	3,42		
			2	5,03%	100,2	197,6	1558,16	3320	2,02	101,18%	22,68	8,46	2,68	4,16			
				5,07%	100,2	196,8	1551,86	3310	2,02	101,24%	22,68	8,47	2,68	4,58			
				5,10%	100,4	198,1	1568,35	3290	1,99	99,54%	22,68	8,33	2,72	4,50			

### APÊNDICE B - RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RCS: MISTURA REF

Cimento (%)	Cal (%)	Cura (dias)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	$\gamma_d$ medido (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	$\eta$ (%)	Ci% (%)	$\eta$ /Ci%	RCS (Mpa)
4,00%	3,00%	7	1,8	5,01%	100,3	197,5	1560,49	2960	1,80	100,10%	29,66	4,73	6,28	0,75
				4,95%	100,5	195,8	1553,23	2930	1,79	99,61%	29,66	4,70	6,31	0,87
				5,01%	100,1	199,2	1567,65	2980	1,81	100,32%	29,66	4,74	6,26	0,80
			1,9	5,02%	100,3	197,3	1558,91	3150	1,92	101,01%	25,75	5,03	5,12	1,11
				5,05%	100,3	198,5	1568,39	3110	1,88	99,09%	25,75	4,94	5,21	1,11
				4,97%	100,4	196,3	1554,10	3120	1,91	100,41%	25,75	5,00	5,15	1,14
			2	5,30%	100,3	197,5	1560,49	3310	2,01	100,44%	21,85	5,28	4,13	1,63
				5,03%	100,1	196,8	1548,76	3270	2,01	100,26%	21,85	5,26	4,15	1,69
				4,98%	100,2	197,8	1559,74	3280	2,00	99,91%	21,85	5,24	4,17	1,71
		91	1,8	5,02%	100,5	198,2	1572,27	2980	1,80	100,01%	29,66	4,72	6,28	1,38
				4,99%	100,0	198,5	1559,02	2970	1,81	100,55%	29,66	4,75	6,25	1,65
				5,03%	100,3	197,5	1560,49	2960	1,80	100,08%	29,66	4,73	6,28	1,58
			1,9	5,01%	100,2	198,2	1562,90	3160	1,92	101,08%	25,75	5,04	5,11	2,50
				4,97%	100,1	195,8	1540,89	3110	1,92	100,95%	25,75	5,03	5,12	2,58
				4,98%	100,5	197,5	1566,72	3160	1,92	100,87%	25,75	5,02	5,13	2,14
			2	5,01%	100,3	198,5	1568,39	3300	2,00	99,93%	21,85	5,24	4,17	4,27
				5,05%	100,2	198,6	1566,05	3320	2,01	100,65%	21,85	5,28	4,14	3,61
				5,03%	100,1	199,2	1567,65	3310	2,01	100,26%	21,85	5,26	4,15	4,16
4,00%	6,00%	7	1,8	5,02%	100,3	198,5	1568,39	2980	1,80	100,26%	29,66	6,78	4,37	0,97
				5,05%	100,1	198,3	1560,56	2990	1,82	101,07%	29,66	6,84	4,34	0,99
				5,01%	100,3	197,2	1558,12	2960	1,80	100,25%	29,66	6,78	4,37	0,94
			1,9	4,97%	100,2	197,5	1557,38	3150	1,92	101,16%	25,75	7,22	3,57	1,45
				4,96%	100,1	197,3	1552,69	3090	1,89	99,55%	25,75	7,10	3,63	1,35
				5,02%	100,2	198,3	1563,68	3150	1,91	100,70%	25,75	7,19	3,58	1,44
			2	4,98%	100,3	198,2	1566,02	3290	2,00	99,81%	21,85	7,50	2,91	2,00
				4,97%	100,1	196,3	1544,83	3280	2,02	100,88%	21,85	7,58	2,88	2,13
				5,02%	100,4	198,2	1569,14	3300	2,00	99,87%	21,85	7,51	2,91	1,97
		91	1,8	5,02%	100,3	197,5	1560,49	2990	1,82	101,10%	29,66	6,84	4,34	3,52
				4,99%	100,1	197,5	1554,27	2930	1,79	99,50%	29,66	6,73	4,41	2,08
				5,03%	100,1	198,2	1559,78	2990	1,82	101,14%	29,66	6,84	4,33	2,03
			1,9	5,02%	100,1	198,3	1560,56	3160	1,92	101,22%	25,75	7,23	3,56	2,01
				5,01%	100,4	197,8	1565,97	3130	1,90	99,93%	25,75	7,14	3,61	2,89
				4,98%	100,2	198,5	1565,26	3170	1,92	101,28%	25,75	7,23	3,56	2,98
			2	5,03%	100,1	199,2	1567,65	3320	2,01	100,56%	21,85	7,56	2,89	3,02
				4,98%	100,3	197,5	1560,49	3330	2,03	101,38%	21,85	7,62	2,87	4,26
				5,05%	100,2	198,5	1565,26	3310	2,01	100,39%	21,85	7,55	2,89	4,57
5,00%	3,00%	7	1,8	4,98%	100,2	198,5	1565,26	2970	1,80	100,16%	29,67	5,40	5,50	1,45
				5,10%	100,3	197,8	1562,86	2980	1,81	100,53%	29,67	5,42	5,47	1,41
				5,06%	100,1	196,5	1546,40	2980	1,83	101,64%	29,67	5,48	5,41	1,31
			1,9	5,07%	100,2	198,3	1563,68	3140	1,91	100,33%	25,76	5,71	4,51	1,92
				4,99%	100,2	197,5	1557,38	3130	1,91	100,50%	25,76	5,72	4,51	2,01

		91	2	4,98%	100,3	199,2	1573,92	3160	1,91	100,41%	25,76	5,71	4,51	1,88		
				5,01%	100,1	195,9	1541,68	3300	2,03	101,66%	21,86	6,09	3,59	2,83		
				5,03%	100,4	196,8	1558,06	3290	2,01	100,27%	21,86	6,01	3,64	2,80		
			5,06%	100,3	198,5	1568,39	3280	1,99	99,27%	21,86	5,95	3,67	2,83			
			4,94%	100,1	199,5	1570,01	2970	1,80	99,90%	29,67	5,38	5,51	2,08			
			5,09%	100,2	196,8	1551,86	2980	1,82	101,25%	29,67	5,46	5,43	2,03			
			5,08%	100,3	197,8	1562,86	2990	1,82	100,89%	29,67	5,44	5,45	2,01			
			4,98%	100,4	196,2	1553,31	3150	1,93	101,42%	25,76	5,77	4,47	2,89			
			5,03%	100,2	195,5	1541,60	3140	1,93	101,81%	25,76	5,79	4,45	2,98			
			5,01%	100,1	196,5	1546,40	3150	1,93	101,84%	25,76	5,79	4,45	3,02			
			4,86%	100,2	198,5	1565,26	3300	2,01	100,29%	21,86	6,00	3,64	4,26			
			5,09%	100,1	197,6	1555,06	3310	2,02	101,01%	21,86	6,05	3,61	4,57			
		5,10%	100,1	195,8	1540,89	3290	2,03	101,31%	21,86	6,07	3,60	4,16				
		5,00%	6,00%	7	1,8	5,02%	100,4	199,2	1577,06	2990	1,80	100,04%	29,66	7,44	3,99	1,65
						5,08%	100,2	198,5	1565,26	2980	1,81	100,40%	29,66	7,47	3,97	1,75
						5,07%	100,1	198,5	1562,14	2970	1,80	100,27%	29,66	7,46	3,98	1,71
					5,03%	100,3	196,8	1554,96	3110	1,90	99,97%	25,76	7,85	3,28	2,55	
					5,02%	100,2	195,8	1543,97	3100	1,91	100,37%	25,76	7,88	3,27	2,58	
					4,98%	100,1	198,3	1560,56	3120	1,90	99,98%	25,76	7,84	3,28	2,46	
					5,02%	100,3	195,9	1547,84	3300	2,02	101,25%	21,85	8,36	2,61	3,23	
					5,03%	100,4	198,2	1569,14	3290	1,99	99,56%	21,85	8,23	2,66	3,55	
					5,09%	100,1	198,5	1562,14	3300	2,00	100,25%	21,85	8,29	2,64	3,68	
					5,10%	100,4	198,3	1569,93	2990	1,81	100,41%	29,66	7,47	3,97	2,37	
					5,06%	100,4	195,9	1550,93	2970	1,82	101,00%	29,66	7,51	3,95	2,35	
5,00%	100,1				198,5	1562,14	2980	1,81	100,68%	29,66	7,48	3,96	2,42			
91	1,9			5,00%	100,1	197,5	1554,27	3150	1,93	101,33%	25,76	7,95	3,24	3,54		
				4,97%	100,1	199,2	1567,65	3120	1,89	99,54%	25,76	7,81	3,30	3,53		
				4,95%	100,4	195,8	1550,14	3130	1,92	101,01%	25,76	7,92	3,25	3,49		
	5,02%			100,1	196,9	1549,55	3300	2,02	101,14%	21,85	8,35	2,62	4,91			
	5,00%			100,2	197,5	1557,38	3290	2,01	100,35%	21,85	8,29	2,64	4,90			
	4,98%			100,1	198,6	1562,93	3290	2,00	100,01%	21,85	8,26	2,65	4,94			

### APÊNDICE C - RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RTCD: MISTURA FP

Cimento (%)	Cal (%)	Cura (dias)	γd (g/cm³)	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm³)	Peso (g)	γd medido (g/cm³)	GC (%)	η(%)	CI% (%)	η/Ci%	RTCD (MPa)	MR (Mpa)		
4,00%	3,00%	7	1,8	5,10%	99,89	60,02	470,12	885	1,79	99,25%	30,40	4,73	6,42	0,1	2937,60		
				4,97%	100,1	61,40	482,99	925	1,82	101,11%	30,40	4,82	6,31	0,11	2616,00		
				4,93%	100,4	62,52	494,72	935	1,80	99,82%	30,40	4,75	6,39	0,09	2808,00		
			1,9	5,10%	100,3	59,00	465,90	941	1,92	100,88%	26,53	5,08	5,22	0,18	4488,00		
				5,12%	100,2	59,60	469,72	948	1,91	100,78%	26,53	5,08	5,23	0,18	4173,12		
				4,98%	100,1	58,39	459,31	930	1,92	101,26%	26,53	5,09	5,21	0,16	4200,00		
			2	4,96%	100,3	61,40	484,92	1020	2,00	99,96%	22,66	5,29	4,28	0,28	6648,00		
				5,00%	99,89	60,80	476,25	1012	2,02	100,94%	22,66	5,34	4,24	0,26	6494,40		
				5,03%	100,1	60,74	477,78	1010	2,01	100,38%	22,66	5,32	4,26	0,27	6072,00		
		91	1,8	4,96%	100,5	59,00	467,76	885	1,80	99,90%	30,40	4,76	6,39	0,26	5400,00		
				4,93%	98,99	60,68	466,78	895	1,82	101,27%	30,40	4,82	6,30	0,26	4968,58		
				4,97%	100,5	60,38	478,74	905	1,80	99,80%	30,40	4,75	6,39	0,24	4152,00		
			1,9	4,96%	100,1	60,50	475,88	955	1,91	100,38%	26,53	5,05	5,26	0,44	7130,30		
				5,00%	100,3	60,56	478,26	953	1,89	99,63%	26,53	5,01	5,29	0,43	8322,91		
				5,03%	100,1	60,50	475,88	952	1,90	99,99%	26,53	5,03	5,27	0,43	6478,94		
			2	4,96%	100,2	60,68	478,26	1020	2,03	101,35%	22,66	5,36	4,23	0,7	9528,00		
				4,93%	100,3	60,74	479,69	1020	2,02	101,08%	22,66	5,35	4,24	0,69	9464,45		
				4,97%	100,2	60,44	476,36	1010	2,01	100,74%	22,66	5,33	4,25	0,68	8894,40		
		4,00%	6,00%	7	1,8	5,00%	100,4	60,68	480,17	905	1,79	99,47%	30,42	6,82	4,46	0,13	2746,85
						5,03%	100,3	60,62	478,74	899	1,78	99,08%	30,42	6,79	4,48	0,12	3087,94
						5,10%	100,2	60,50	476,83	912	1,82	100,84%	30,42	6,92	4,40	0,12	3884,54
1,9	5,05%				100,3	59,00	465,90	939	1,91	100,72%	26,55	7,29	3,64	0,18	6873,60		

				4,99%	100,2	59,60	469,72	945	1,91	100,60%	26,55	7,28	3,65	0,19	5030,40			
				5,02%	99,9	60,38	472,95	952	1,91	100,62%	26,55	7,28	3,65	0,18	3754,66			
				5,08%	100,1	60,68	477,30	1015	2,02	100,93%	22,69	7,69	2,95	0,29	8088,00			
			2	5,00%	100,5	58,88	466,81	995	2,02	101,25%	22,69	7,71	2,94	0,3	8073,60			
				5,03%	98,99	60,32	464,00	989	2,02	101,21%	22,69	7,71	2,94	0,29	7608,00			
				4,96%	100,2	60,50	476,83	899	1,79	99,55%	30,42	6,82	4,46	0,38	5594,02			
		91	1,8	5,05%	100,2	60,68	478,26	901	1,79	99,38%	30,42	6,82	4,46	0,36	5068,80			
				5,00%	100,3	59,36	468,75	898	1,82	101,11%	30,42	6,93	4,39	0,37	5582,40			
				4,97%	100,3	59,48	469,70	941	1,90	100,20%	26,55	7,25	3,66	0,68	7848,00			
			1,9	4,93%	100,3	58,88	464,95	935	1,91	100,62%	26,55	7,27	3,65	0,63	7654,46			
				5,10%	100,4	59,60	471,59	945	1,90	100,09%	26,55	7,25	3,66	0,63	7475,42			
				5,09%	100,2	60,38	475,89	1008	2,01	100,52%	22,69	7,66	2,96	0,83	9657,60			
			2	5,08%	100,3	60,68	479,21	1053	2,03	101,29%	22,69	7,95	2,85	0,89	10920,00			
				5,00%	100,2	60,74	478,73	1015	2,01	100,71%	22,69	7,67	2,96	0,86	10728,00			
				4,98%	99,89	60,56	474,36	895	1,79	99,60%	30,39	5,41	5,62	0,12	3004,41			
			5,00%	3,00%	7	1,8	5,10%	100,1	60,32	474,46	896	1,79	99,56%	30,39	5,42	5,61	0,15	4714,03
							4,97%	100,5	59,48	471,58	890	1,79	99,64%	30,39	5,41	5,61	0,16	5097,04
							4,93%	98,99	59,60	458,44	928	1,92	101,29%	26,52	5,81	4,57	0,15	7682,23
1,9	5,10%	100,5				59,54	472,06	935	1,88	98,93%	26,52	5,68	4,67	0,22	4125,49			
	5,12%	100,1				60,26	473,99	945	1,89	99,56%	26,52	5,72	4,64	0,23	6676,31			
	4,98%	100,3				60,74	479,69	1010	2,00	100,03%	22,66	6,04	3,75	0,25	8848,50			
2	4,98%	100				60,68	476,35	1015	2,02	101,23%	22,66	6,11	3,71	0,30	8848,50			
	5,01%	100,5				59,36	470,63	998	2,01	100,72%	22,66	6,08	3,73	0,32	8926,02			
	4,98%	100,1				60,38	474,94	895	1,79	99,48%	30,39	5,41	5,62	0,43	6478,37			
91	1,8	4,95%			100,1	60,68	477,30	901	1,79	99,68%	30,39	5,41	5,61	0,4	5902,00			

				5,12%	100,4	58,88	465,88	895	1,82	101,26%	30,39	5,51	5,52	0,38	7244,95
			1,9	5,09%	100,2	60,38	475,89	950	1,89	99,72%	26,52	5,73	4,63	0,68	10194,39
				4,95%	100,1	60,68	477,30	955	1,90	100,09%	26,52	5,74	4,62	0,67	9251,42
				5,03%	100	60,74	476,82	961	1,91	100,74%	26,52	5,78	4,59	0,66	9282,00
			2	5,07%	100,1	60,38	474,94	1009	2,02	100,84%	22,66	6,09	3,72	0,99	12490,40
				5,10%	100,3	60,80	480,16	1012	2,00	100,01%	22,66	6,05	3,75	1,05	12090,00
				5,10%	100,4	60,38	477,79	1002	1,99	99,51%	22,66	6,02	3,77	1,00	11622,00
5,00%	6,00%	7	1,8	4,98%	100,4	60,68	480,17	902	1,78	99,16%	30,41	7,46	4,08	0,17	4786,61
				4,97%	100,3	58,88	464,95	890	1,82	101,06%	30,41	7,60	4,00	0,16	4393,96
				5,00%	100,2	60,38	475,89	898	1,79	99,59%	30,41	7,49	4,06	0,19	5015,95
			1,9	5,03%	100,1	60,68	477,30	952	1,89	99,70%	26,55	7,92	3,35	0,26	6663,15
				5,10%	100,3	58,88	464,95	942	1,92	101,19%	26,55	8,04	3,30	0,24	6596,85
				5,05%	99,89	59,48	465,87	935	1,91	100,30%	26,55	7,97	3,33	0,27	6930,90
			2	4,99%	100,1	59,78	470,20	1005	2,03	101,54%	22,68	8,49	2,67	0,37	9751,20
				5,02%	100,5	60,01	475,78	1009	2,01	100,71%	22,68	8,42	2,69	0,36	9511,50
				5,08%	98,99	60,68	466,78	989	2,01	100,56%	22,68	8,41	2,70	0,33	10123,50
		91	1,8	4,97%	100,5	60,32	478,26	902	1,79	99,57%	30,41	7,49	4,06	0,45	6510,40
				5,00%	100,1	60,32	474,46	910	1,82	101,23%	30,41	7,62	3,99	0,48	6820,63
				5,03%	100,3	60,38	476,84	905	1,80	100,14%	30,41	7,54	4,04	0,53	7326,80
			1,9	5,10%	100,3	60,68	479,21	955	1,89	99,54%	26,55	7,91	3,35	0,83	10486,11
				5,10%	100,3	58,88	464,95	935	1,91	100,44%	26,55	7,98	3,32	0,79	10415,60
				5,09%	100,4	60,32	477,31	948	1,89	99,21%	26,55	7,89	3,37	0,77	9698,00
			2	5,08%	100,2	60,38	475,89	1010	2,01	100,73%	22,68	8,43	2,69	1,09	12662,00
				5,00%	100,3	60,68	479,21	1008	2,00	99,91%	22,68	8,35	2,72	1,10	12755,60
				4,98	100,2	58,88	464,02	991	2,03	101,47	22,68	8,48	2,67	1,05	12472,20

**APÊNDICE D – RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RTCD E MR: MISTURA REF**

Cimento (%)	Cal (%)	Cura (dias)	yd (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	yd medido (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	η(%)	CI (%)	η/Ci%	RTCD (Mpa)	MR (Mpa)
4,00%	3,00%	7	1,8	4,93%	100,1	60,68	477,30	898	1,79	99,37%	29,66	4,69	6,33	0,10	6804,76
				5,10%	100,3	60,74	479,69	910	1,80	100,02%	29,66	4,73	6,28	0,11	6457,50
				5,09%	100	60,56	475,41	915	1,83	101,48%	29,66	4,79	6,19	0,09	6502,23
			1,9	5,08%	100,5	60,32	478,26	965	1,92	100,80%	25,75	5,58	4,62	0,18	7521,32
				5,00%	98,99	59,48	457,52	928	1,93	101,42%	25,75	5,66	4,55	0,18	10107,97
				4,98%	100	59,60	467,84	945	1,92	101,02%	25,75	5,54	4,65	0,16	10407,60
			2	4,96%	100,2	59,54	469,24	988	2,00	100,05%	22,27	5,56	4,01	0,28	13122,90
				4,98%	99,89	59,00	462,10	985	2,03	101,27%	21,85	5,52	3,96	0,26	12820,50
				5,01%	100,1	59,60	468,78	988	2,00	100,10%	21,85	5,41	4,04	0,27	13567,68
		91	1,8	4,98%	100,2	60,38	475,89	912	1,82	101,17%	29,66	4,77	6,21	0,26	9153,90
				4,95%	99,98	60,68	476,16	910	1,82	100,92%	29,66	4,76	6,23	0,26	8725,50
				5,12%	100,3	58,88	464,95	890	1,82	100,90%	29,66	4,77	6,22	0,24	9670,50
			1,9	5,09%	100,2	60,32	475,41	945	1,89	99,29%	25,75	4,95	5,20	0,44	12297,60
				4,96%	100	60,50	474,93	948	1,90	99,85%	25,75	4,97	5,18	0,43	11982,60
				4,93%	100,1	60,68	477,30	952	1,90	99,80%	25,75	4,97	5,18	0,43	13261,50
			2	4,97%	99,95	59,36	465,49	985	2,01	100,54%	21,85	5,27	4,14	0,70	16181,74
				5,00%	100,3	59,48	469,70	980	1,98	99,10%	21,85	5,20	4,20	0,69	15971,76
				5,03%	100,3	59,60	470,66	990	2,00	99,88%	21,85	5,24	4,17	0,68	15665,14

4,00%	6,00%	7	1,8	5,10%	100,1	59,00	464,05	890	1,82	101,12%	29,66	6,85	4,33	0,13	5279,78	
				5,05%	100	59,60	467,84	895	1,82	100,91%	29,66	6,83	4,34	0,12	8385,68	
				4,99%	98,99	60,38	464,46	891	1,82	101,26%	29,66	6,85	4,33	0,12	9385,87	
			1,9	5,02%	100,01	60,68	476,45	948	1,89	99,47%	25,75	7,10	3,63	0,18	11424,17	
				5,00%	100	58,88	462,17	932	1,92	100,83%	25,75	7,20	3,58	0,19	9295,52	
				4,98%	100,5	60,32	478,26	965	1,92	100,91%	25,75	7,20	3,58	0,18	12358,96	
			2	4,98%	100	60,50	474,93	995	1,99	99,54%	21,85	7,48	2,92	0,29	14965,27	
				5,01%	102	60,68	495,60	1050	2,01	100,63%	21,85	7,56	2,89	0,30	12411,13	
				4,98%	100,5	59,36	470,63	1005	2,03	101,46%	21,85	7,62	2,87	0,29	14997,15	
		91	1,8	4,95%	99,89	60,80	476,25	899	1,79	99,68%	29,66	6,74	4,40	0,38	9988,65	
				5,12%	100,1	60,74	477,78	901	1,79	99,40%	29,66	6,73	4,41	0,36	11119,50	
				5,09%	100	59,00	463,12	900	1,83	102,47%	29,66	6,94	4,28	0,37	10407,60	
				1,9	5,09%	100,3	60,68	479,21	965	1,91	100,59%	27,44	7,19	3,82	0,68	12513,69
					5,08%	100,2	60,38	475,89	962	1,92	100,99%	25,75	7,22	3,57	0,63	13142,18
					5,00%	100,1	60,56	476,36	960	1,91	100,76%	25,75	7,19	3,58	0,63	14254,00
2	4,98%			98,89	60,32	463,06	985	2,02	101,06%	21,85	7,59	2,88	0,83	17325,00		
	4,98%			99,89	59,48	465,87	990	2,02	100,96%	21,85	7,59	2,88	0,89	18446,53		
	5,01%			100,1	59,60	468,78	995	2,02	100,81%	21,85	7,58	2,88	0,86	18490,50		
5,00%	3,00%		7	1,8	4,98%	100,5	59,54	472,06	895	1,80	100,09%	29,66	5,39	5,50	0,15	9652,50
					4,95%	98,99	60,26	463,54	888	1,82	101,16%	29,66	5,45	5,44	0,16	9847,50
					5,12%	99,89	60,68	475,30	895	1,79	99,26%	29,66	5,36	5,54	0,15	9977,50

5,00%	6,00%	91	1,9	5,09%	100,1	60,74	477,78	955	1,90	99,85%	25,75	5,69	4,53	0,22	15366,52
				5,02%	100	60,56	475,41	956	1,91	100,52%	25,75	5,72	4,50	0,23	10556,52
				5,08%	100,3	60,32	476,36	965	1,92	101,20%	25,75	5,76	4,47	0,25	12132,77
			2	5,00%	100,2	59,48	468,77	985	2,00	99,81%	21,85	5,98	3,66	0,30	13663,00
				4,98%	100,1	59,60	468,78	1001	2,03	101,45%	21,85	6,07	3,60	0,32	15688,79
				5,01%	100,1	59,54	468,31	998	2,02	101,22%	21,85	6,06	3,60	0,33	17178,20
			1,8	4,98%	100,2	59,60	469,72	902	1,82	101,37%	29,66	5,46	5,43	0,43	13079,48
				4,95%	100,3	60,38	476,84	898	1,79	99,45%	29,66	5,36	5,54	0,40	12650,48
				5,12%	100,3	60,68	479,21	910	1,80	100,10%	29,66	5,40	5,49	0,38	11532,84
			1,9	5,09%	100,4	58,88	465,88	945	1,92	101,33%	25,75	5,77	4,46	0,68	14864,65
				4,93%	99,89	60,32	472,47	940	1,89	99,55%	25,75	5,66	4,55	0,67	16221,48
				5,02%	100,1	60,50	475,88	948	1,89	99,58%	25,75	5,67	4,54	0,66	15534,82
		2	5,06%	100,5	60,68	481,13	1010	1,99	99,65%	21,85	5,97	3,66	0,99	19597,25	
			5,10%	100,3	59,36	468,75	1001	2,03	101,33%	21,85	6,07	3,60	1,05	21651,30	
			4,98%	100,2	59,48	468,77	1001	2,03	101,45%	21,85	6,07	3,60	1,00	19094,59	
		7	1,8	4,97%	99,89	60,68	475,30	898	1,80	99,75%	29,66	7,41	4,00	0,17	11394,50
				4,93%	100,1	60,74	477,78	905	1,80	100,04%	29,66	7,43	3,99	0,16	11477,31
				5,10%	100,5	60,56	480,17	910	1,80	99,92%	29,66	7,43	3,99	0,19	11862,50
			1,9	5,09%	98,99	60,32	464,00	942	1,92	101,41%	25,76	7,96	3,23	0,26	13936,26
				5,08%	99,89	60,68	475,30	945	1,89	99,33%	25,76	7,80	3,30	0,24	14019,98
				5,00%	100,1	60,74	477,78	950	1,89	99,42%	25,76	7,80	3,30	0,27	13208,00

		2	4,98%	100,5	60,56	480,17	1020	2,02	100,92%	21,85	8,33	2,62	0,37	17873,70	
			4,96%	98,99	60,32	464,00	989	2,03	101,29%	21,85	8,36	2,61	0,36	16412,50	
			4,93%	99,89	59,48	465,87	992	2,02	101,22%	21,85	8,35	2,62	0,33	16109,08	
		91	1,8	5,02%	100,1	59,60	468,78	883	1,79	99,39%	29,66	7,39	4,01	0,45	13365,00
				5,06%	100	59,54	467,37	879	1,79	99,20%	29,66	7,38	4,02	0,48	14091,00
				4,96%	100,3	60,68	479,21	905	1,79	99,71%	29,66	7,41	4,00	0,53	13721,53
			1,9	4,93%	100,2	60,68	478,26	954	1,90	99,81%	25,76	7,83	3,29	0,83	16071,00
				4,97%	100,1	60,74	477,78	968	1,91	101,33%	25,76	7,95	3,24	0,79	16929,00
				5,00%	100,3	60,56	478,26	973	1,92	101,72%	25,76	7,98	3,23	0,77	17173,20
			2	5,03%	99,89	60,32	472,47	1012	2,03	101,71%	21,85	8,40	2,60	1,09	20614,04
				5,10%	100,1	59,48	467,83	983	1,99	99,70%	21,85	8,24	2,65	1,10	20582,10
				5,05%	100,5	59,60	472,53	998	2,01	100,27%	21,85	8,29	2,64	1,05	21153,00

**APÊNDICE E – RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RTF : MISTURA FP**

Cimento (%)		Cal (%)	Cura (dias)	γd (g/cm³)	w (%)	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Volume (cm³)	Peso (g)	γd medido (g/cm³)	GC (%)	η(%)	CI% (%)	η/Ci%	RTF (Mpa)	
4,00%		3,00%	7	1,8	5,01%	98,89	100,3	400,02	3967,67	7560	1,81	100,55%	30,40	5,08	5,98	0,12	
					5,05%	100,3	100,2	400	4020,02	7565	1,79	99,27%	30,40	5,02	6,06	0,12	
					5,00%	100	100	401	4010,00	7650	1,81	100,69%	30,40	5,09	5,98	0,15	
				1,9	4,98%	100,1	100,1	400,2	4010,01	7980	1,89	99,52%	26,53	5,31	5,00	0,16	
					4,96%	100,2	99,95	398,9	3994,98	7989	1,90	100,03%	26,53	5,33	4,98	0,17	
					4,95%	100	100,3	402	4032,06	7982	1,88	99,03%	26,53	5,28	5,03	0,19	
				2	5,03%	99,89	100,3	400,1	4008,59	8450	2,00	100,10%	22,66	5,62	4,03	0,19	
					5,07%	101	100,1	400,2	4046,06	8435	1,98	98,95%	22,66	5,56	4,08	0,19	
					5,10%	100,5	100	400,8	4028,04	8455	1,99	99,60%	22,66	5,60	4,05	0,18	
			91		1,8	5,10%	99,89	98,99	398,99	3945,26	7530	1,81	100,63%	30,40	4,80	6,33	0,36
						4,98%	100,1	100,01	400,02	4004,60	7510	1,78	99,00%	30,40	4,72	6,44	0,32
						5,05%	100,5	100,3	400,1	4033,07	7685	1,81	100,51%	30,40	4,79	6,34	0,34
					1,9	4,96%	98,99	100,3	400,3	3974,46	7950	1,90	100,06%	26,53	5,03	5,27	0,54
						5,10%	100,5	100	399,98	4019,80	8085	1,91	100,46%	26,53	5,06	5,24	0,54
						4,98%	100,1	98,99	400,02	3963,76	8055	1,93	101,63%	26,53	5,11	5,19	0,57
					2	4,97%	100,3	98,99	398,99	3961,45	8350	2,00	100,15%	22,66	5,30	4,28	0,81
						4,93%	100	100	400	4000,00	8401	2,00	99,84%	22,66	5,28	4,29	0,79
						5,10%	100,5	100,1	402	4044,14	8601	2,02	100,92%	22,66	5,35	4,24	0,82
4,00%		6,00%	7	1,8	5,09%	100,1	100,2	400,2	4014,01	7585	1,79	99,64%	30,42	6,84	4,45	0,13	
					5,08%	100,1	100,3	401	4026,05	7590	1,79	99,41%	30,42	6,82	4,46	0,14	
					5,00%	100,4	100,3	400,02	4028,25	7650	1,80	100,23%	30,42	6,87	4,43	0,16	
				1,9	4,98%	100,2	100,4	400,5	4029,06	8105	1,91	100,60%	26,55	7,28	3,65	0,18	
					4,96%	100,1	99,89	400	3999,60	8095	1,92	101,24%	26,55	7,32	3,63	0,16	





**APÊNDICE F - RESULTADOS GERAIS DO ENSAIO DE RTF : MISTURA REF**

Cimento (%)	Cal (%)	Cura (dias)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	$\gamma_d$ medido (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	$\eta$ (%)	CI% (%)	$\eta$ /Ci%	RTF (Mpa)
4,00%	3,00%	7	1,8	5,01%	98,89	100,3	400,02	3967,67	7560	1,81	100,55%	29,66	4,75	6,25	0,12
				5,05%	100,3	100,2	400	4020,02	7565	1,79	99,27%	29,66	4,69	6,33	0,12
				5,00%	100	100	401	4010,00	7650	1,81	100,69%	29,66	4,75	6,24	0,15
			1,9	4,98%	100,1	100,1	400,2	4010,01	7980	1,89	99,52%	25,75	5,50	4,68	0,16
				4,96%	100,2	99,95	398,9	3994,98	7989	1,90	100,03%	25,75	5,58	4,62	0,18
				4,95%	100	100,3	402	4032,06	7982	1,88	99,03%	25,75	5,43	4,75	0,20
			2	5,03%	99,89	100,3	400,1	4008,59	8450	2,00	100,10%	22,27	5,57	4,00	0,20
				5,07%	101	100,1	400,2	4046,06	8435	1,98	98,95%	21,85	5,40	4,04	0,20
				5,10%	100,5	100	400,8	4028,04	8455	1,99	99,60%	21,85	5,39	4,06	0,19
		91	1,8	5,10%	99,89	98,99	398,99	3945,26	7530	1,81	100,63%	29,66	4,80	6,18	0,41
				4,98%	100,1	100,01	400,02	4004,60	7510	1,78	99,00%	29,66	4,72	6,29	0,37
				5,05%	100,5	100,3	400,1	4033,07	7685	1,81	100,51%	29,66	4,79	6,19	0,39
			1,9	4,96%	98,99	100,3	400,3	3974,46	7950	1,90	100,06%	25,75	5,03	5,12	0,61
				5,10%	100,5	100	399,98	4019,80	8085	1,91	100,46%	25,75	5,06	5,09	0,61
				4,98%	100,1	98,99	400,02	3963,76	8055	1,93	101,63%	25,75	5,11	5,04	0,65
			2	4,97%	100,3	98,99	398,99	3961,45	8350	2,00	100,15%	21,85	5,30	4,12	0,92
				4,93%	100	100	400	4000,00	8401	2,00	99,84%	21,85	5,28	4,13	0,90
				5,10%	100,5	100,1	402	4044,14	8601	2,02	100,92%	21,85	5,35	4,08	0,93
4,00%	6,00%	7	1,8	5,09%	100,1	100,2	400,2	4014,01	7585	1,79	99,64%	29,66	6,75	4,40	0,14
				5,08%	100,1	100,3	401	4026,05	7590	1,79	99,41%	29,66	6,73	4,41	0,15
				5,00%	100,4	100,3	400,02	4028,25	7650	1,80	100,23%	29,66	6,78	4,38	0,17
			1,9	4,98%	100,2	100,4	400,5	4029,06	8105	1,91	100,60%	25,75	7,18	3,59	0,20
				4,96%	100,1	99,89	400	3999,60	8095	1,92	101,24%	25,75	7,23	3,56	0,18
				4,93%	100,0	100,1	400,1	4005,00	8065	1,91	100,76%	25,75	7,19	3,58	0,18

5,00%	91	2	5,02%	100,1	100,5	400	4024,02	8450	1,99	99,72%	21,85	7,50	2,91	0,20	
			5,06%	100,3	100,3	402	4044,16	8520	2,00	100,01%	21,85	7,52	2,90	0,21	
			5,10%	100,4	100,2	398,99	4013,87	8580	2,03	101,43%	21,85	7,63	2,86	0,23	
		1,8	4,97%	100,2	99,89	400,02	4003,79	7650	1,82	100,87%	29,66	6,89	4,31	0,53	
			4,93%	100,2	100,1	400,02	4012,21	7590	1,80	99,91%	29,66	6,82	4,35	0,50	
			5,10%	100,3	100,5	400	4032,06	7595	1,79	99,31%	29,66	6,79	4,37	0,48	
		1,9	5,12%	100,3	98,99	401	3981,41	7990	1,90	100,21%	27,44	7,24	3,79	0,79	
			4,98%	100,3	100,5	405	4082,46	8100	1,89	99,23%	25,75	7,15	3,60	0,79	
			4,96%	100,4	100,1	400,02	4020,22	8050	1,90	100,16%	25,75	7,22	3,57	0,76	
		2	5,00%	100,2	100,3	400,5	4025,05	8500	2,01	100,31%	21,85	7,61	2,87	1,10	
			5,03%	100,3	100	399,99	4011,90	8495	2,01	100,55%	21,85	7,63	2,86	1,11	
			4,96%	100,2	100,5	400,02	4028,24	8485	2,00	100,10%	21,85	7,59	2,88	1,08	
		7	1,8	4,93%	99,89	98,99	400,02	3955,44	7450	1,79	99,48%	29,66	5,25	5,65	0,18
				4,97%	100,1	100	401	4014,01	7585	1,80	99,76%	29,66	5,27	5,63	0,15
				5,00%	100,5	100,2	402	4048,18	7610	1,79	99,21%	29,66	5,24	5,66	0,15
	1,9		5,03%	98,99	100,4	400,7	3982,40	7950	1,90	99,78%	25,75	5,56	4,63	0,18	
			5,10%	100,5	100,5	400,5	4045,15	8015	1,88	98,96%	25,75	5,52	4,66	0,21	
			5,05%	100,1	98,99	400,1	3964,55	8050	1,93	101,47%	25,75	5,66	4,55	0,20	
	2		4,99%	100,3	101	400	4052,12	8450	1,98	99,06%	21,85	5,81	3,76	0,23	
			5,02%	100	100,3	398,98	4001,77	8510	2,02	100,99%	21,85	5,93	3,69	0,24	
			5,08%	100,5	100	401	4030,05	8502	2,00	100,12%	21,85	5,88	3,71	0,26	
91	1,8		4,97%	100,1	99,89	402	4019,59	7650	1,81	100,48%	29,66	5,47	5,42	0,65	
			5,00%	100,2	100,1	400,3	4015,02	7720	1,83	101,48%	29,66	5,52	5,37	0,69	
			5,03%	100,3	100,5	400,5	4037,10	7650	1,80	99,98%	29,66	5,44	5,45	0,66	
	1,9		5,10%	100,2	98,99	400,02	3967,72	8050	1,93	101,34%	25,75	5,83	4,42	0,96	
			5,05%	100,4	100,5	401	4046,17	8010	1,88	98,93%	25,75	5,69	4,53	0,95	
			4,99%	100,3	100,1	400,3	4019,02	8075	1,91	100,47%	25,75	5,77	4,46	0,96	
	2	5,02%	100,2	100,3	400,2	4022,03	8550	2,02	100,95%	21,85	6,11	3,58	1,27		
		5,08%	100,1	100	400,1	4005,00	8510	2,02	100,85%	21,85	6,10	3,58	1,27		
	3,00%	91	1,8	4,93%	99,89	98,99	400,02	3955,44	7450	1,79	99,48%	29,66	5,25	5,65	0,18
4,97%				100,1	100	401	4014,01	7585	1,80	99,76%	29,66	5,27	5,63	0,15	
5,00%				100,5	100,2	402	4048,18	7610	1,79	99,21%	29,66	5,24	5,66	0,15	
1,9			5,03%	98,99	100,4	400,7	3982,40	7950	1,90	99,78%	25,75	5,56	4,63	0,18	
			5,10%	100,5	100,5	400,5	4045,15	8015	1,88	98,96%	25,75	5,52	4,66	0,21	
			5,05%	100,1	98,99	400,1	3964,55	8050	1,93	101,47%	25,75	5,66	4,55	0,20	
2			4,99%	100,3	101	400	4052,12	8450	1,98	99,06%	21,85	5,81	3,76	0,23	
			5,02%	100	100,3	398,98	4001,77	8510	2,02	100,99%	21,85	5,93	3,69	0,24	
			5,08%	100,5	100	401	4030,05	8502	2,00	100,12%	21,85	5,88	3,71	0,26	
1,8			4,97%	100,1	99,89	402	4019,59	7650	1,81	100,48%	29,66	5,47	5,42	0,65	
			5,00%	100,2	100,1	400,3	4015,02	7720	1,83	101,48%	29,66	5,52	5,37	0,69	
			5,03%	100,3	100,5	400,5	4037,10	7650	1,80	99,98%	29,66	5,44	5,45	0,66	
1,9			5,10%	100,2	98,99	400,02	3967,72	8050	1,93	101,34%	25,75	5,83	4,42	0,96	
			5,05%	100,4	100,5	401	4046,17	8010	1,88	98,93%	25,75	5,69	4,53	0,95	
			4,99%	100,3	100,1	400,3	4019,02	8075	1,91	100,47%	25,75	5,77	4,46	0,96	
2	5,02%	100,2	100,3	400,2	4022,03	8550	2,02	100,95%	21,85	6,11	3,58	1,27			
	5,08%	100,1	100	400,1	4005,00	8510	2,02	100,85%	21,85	6,10	3,58	1,27			

				5,00%	100,3	100,5	400	4032,06	8601	2,03	101,32%	21,85	6,13	3,56	1,23
5,00%	6,00%	7	1,8	5,03%	99,89	100	405	4045,55	7750	1,82	101,07%	29,66	7,52	3,95	0,17
				4,96%	100,1	102	401	4094,29	7725	1,79	99,62%	29,66	7,40	4,01	0,18
				5,05%	100,5	100,5	405	4090,60	7740	1,80	99,81%	29,66	7,42	4,00	0,18
			1,9	5,00%	98,99	99,89	400,02	3955,44	8012	1,92	101,28%	25,76	7,95	3,24	0,22
				4,96%	100,5	100,1	400,3	4027,04	8005	1,89	99,43%	25,76	7,80	3,30	0,20
				4,96%	100,1	100	400,5	4009,01	7985	1,89	99,63%	25,76	7,81	3,30	0,20
			2	5,08%	100,3	100,3	401	4034,10	8450	1,99	99,41%	21,85	8,22	2,66	0,27
				5,05%	100	100,2	403	4038,06	8502	2,00	99,96%	21,85	8,26	2,65	0,26
				5,00%	100,5	100,1	398,95	4013,46	8595	2,03	101,72%	21,85	8,40	2,60	0,28
		91	1,8	4,98%	102	98,89	399,98	4034,51	7650	1,80	100,10%	29,66	7,51	3,95	0,65
				4,98%	100,5	100,3	398,5	4016,94	7585	1,79	99,68%	29,66	7,48	3,96	0,74
				5,01%	99,89	100	401	4005,59	7600	1,80	100,13%	29,66	7,52	3,95	0,89
			1,9	4,98%	100,1	100,1	402	4028,04	7985	1,88	99,14%	25,76	7,85	3,28	0,93
				4,95%	100	100,2	400,5	4013,01	7995	1,89	99,67%	25,76	7,89	3,26	1,12
				5,12%	100,3	100	400,6	4018,02	8010	1,89	99,55%	25,76	7,90	3,26	1,14
			2	5,09%	100,2	99,89	403	4033,62	8560	2,01	100,71%	21,85	8,41	2,60	1,41
				5,08%	100,1	101	401	4054,15	8601	2,01	100,69%	21,85	8,41	2,60	1,36
				5,00%	100,4	100,5	402	4056,26	8605	2,02	100,77%	21,85	8,41	2,60	1,40