

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

Marcos Rodrigues da Silva

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL FRESADO  
ESTABILIZADO GRANULOMÉTRICA E QUIMICAMENTE PARA  
EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO**

Santa Maria, RS  
2018



**Marcos Rodrigues da Silva**

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DE MATERIAL FRESADO ESTABILIZADO GRANULOMÉTRICA E  
QUIMICAMENTE 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  
2018



**Marcos Rodrigues da Silva**

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DE MATERIAL FRESADO ESTABILIZADO GRANULOMÉTRICA E  
QUIMICAMENTE 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 27 de setembro de 2018:**

---

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

---

**Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)**

---

**Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque, Dr<sup>a</sup>. (UNESP)**

Santa Maria, RS  
2018



## AGRADECIMENTOS

Com a iminente finalização de mais essa etapa em minha vida, a gratidão se fortalece por esse trabalho de dois anos. Sendo assim, escrevo esta página de agradecimento para todas as pessoas e instituições que participaram e me apoiaram durante o período do mestrado.

Em especial, à minha orientadora Tatiana Cureau Cervo, por ter me dado incentivo e suporte durante todo período de estudo, por ter me guiado e orientado da melhor maneira possível, sendo desde a graduação uma profissional que me inspirou a crescer como profissional e amar a pavimentação. Muito obrigado por ter sempre acreditado em mim e me apoiado.

Aos professores Maria da Consolação, Luciano Specht e Rinaldo Pinheiro pela disponibilidade em compartilhar conhecimentos, ideias e realizar a avaliação como membro da banca examinadora.

Agradeço aos colegas e amigos do GEPPASV: Lucas Bueno, Valdir, Sílvio, Cléber, Fernando Boeira, Chaveli, Ana Helena, Renan, Anderson e Eduardo por estarem sempre dispostos a ajudar.

A todos os voluntários e bolsistas que dedicaram horas de trabalho me auxiliando nas mais diversas tarefas, em especial ao Antônio Daniel que sem dúvida é uma das peças chaves dessa conquista. Obrigado por ter estado ao meu lado nos momentos bons e ruins que se passaram e por ter se tornado um grande amigo.

À toda minha família e minha namorada Fernanda Duarte por terem me acompanhado e ouvido queixas, preocupações e por terem me dado amor, carinho, compreensão, motivação e suporte. Obrigado por me apoiarem incondicionalmente.

Ao LMCC, PPGEC, GEPPASV e à UFSM por todo suporte e disponibilização de pessoal e equipamentos.

À empresa Della Pasqua por disponibilizar materiais necessários à pesquisa.

À Petrobras pelos investimentos realizados em nosso grupo de pesquisa e à CAPES/CNPQ pela bolsa de mestrado.

Enfim, a todos os amigos que estiveram presente e que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta pesquisa.





## RESUMO

### DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL FRESADO ESTABILIZADO GRANULOMÉTRICA E QUIMICAMENTE PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO

AUTOR: MARCOS RODRIGUES DA SILVA  
ORIENTADORA: PROF. DR<sup>a</sup> TATIANA CUREAU CERVO

Os materiais originados da reciclagem de pavimentação asfáltica podem se tornar uma importante alternativa construtiva no setor rodoviário, além de contribuir na política de sustentabilidade. Em razão da importância de preservação das matérias primas e aos significativos custos que englobam as obras de pavimentação, torna-se viável a análise de técnicas econômicas e sustentáveis para implantação ou manutenção de rodovias. A técnica de tratamento de material fresado, também conhecido na literatura internacional por *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), encontra aplicação, por exemplo, na construção de bases ou sub-bases para pavimentos. Contudo, ainda não existem metodologias de dosagem e projeto das misturas de fresado e cimento baseadas em critérios racionais como existe no caso do concreto, em que a relação água/cimento desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada. Nesse sentido, a pesquisa avaliou, por meio de ensaios laboratoriais, a viabilidade da utilização de misturas de RAP e pó de pedra, estabilizadas quimicamente com cimento Portland CP V-ARI, para camadas de base de pavimentos, correlacionando o índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{\%}$ ) com parâmetros de rigidez e resistência das misturas. O material fresado é oriundo da BR-392, enquanto os materiais pétreos são de origem basáltica da formação Serra Geral. Para a estabilização granulométrica se determinou o teor de 70% fresado e 30% pó de pedra; também se ajustou misturas de brita graduada tratada com cimento (BGTC) com mesma curva granulométrica, constituída de materiais pétreos naturais que serviram como mistura Referência. A estabilização química foi de 4%, 5% e 6% em volume. Com os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), resistência à tração na flexão (RTF) e módulo de resiliência (MR), todos com 7 e 28 dias de cura, foram efetuadas correlações das propriedades mecânicas com as características das misturas através da relação  $\eta/C_{\%}$ . A análise dos resultados demonstrou que as propriedades das misturas aumentaram linearmente com a adição de cimento e exponencialmente com a redução de porosidade. A relação  $\eta/C_{\%}$  mostrou-se um excelente critério racional para avaliação do comportamento e na previsão de resistências e módulos para todas as misturas estudadas. As misturas com RAP apresentaram características viscoelásticas oriundas da herança do ligante asfáltico presente em sua composição. Por fim, o desempenho satisfatório corrobora com a possibilidade de abranger os estudos e utilização destes materiais.

**Palavras-chave:** Material fresado. RAP. BGTC. Referência. Propriedades mecânicas. Porosidade. Teor volumétrico de cimento.  $\eta/C_{\%}$ . Resistência. Rigidez.



## ABSTRACT

### DETERMINATION OF PARAMETERS INFLUENCING MECHANICAL PROPERTIES OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT STABILIZED GRANULOMETRIC AND CHEMICALLY FOR PAVEMENT

AUTHOR: MARCOS RODRIGUES DA SILVA  
ADVISOR: PROF. DR<sup>a</sup> TATIANA CUREAU CERVO

The materials originated from the recycling of asphalt paving can become an important constructive alternative in the road sector, besides contributing to the sustainability policy. Due to the preservation importance of the raw materials and the significant costs of paving works, it is feasible to analyze economical and sustainable techniques for the implementation or maintenance of highways. The Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) technique finds application, for example, in the construction of bases or sub-bases for pavements. However, there are still no dosing and design methodologies of mixtures of Reclaimed Asphalt Pavement cemented based on rational criteria such as exists in the case of concrete, in which the water/cement ratio plays a fundamental role in obtaining the desired strength. In this sense, the research evaluated, through laboratory tests, the feasibility of the use of mixtures of RAP and stone powder, chemically stabilized with Portland cement CP V-ARI, for the base layers of pavement, correlating the index porosity/volumetric content of cement ( $\eta/C_{\%}$ ) with parameters of stiffness and resistance of the mixtures. The RAP material comes from the BR-392, while the stone materials are of basaltic origin of the Serra Geral formation. For the granulometric stabilization the content of 70% RAP and 30% of stone powder was determined; also, mixtures of cement-aggregate stabilized with the same granulometric curve, made of natural stone materials that served as reference mixtures. Chemical stabilization was 4%, 5% and 6% by volume. With the results of the resistance tests unconfined compressive, splitting tensile, flexural strength and resilient modulus, all with 7 and 28 days of cure, correlations of the mechanical properties with the characteristics of the mixtures were made through the ratio  $\eta/C_{\%}$ . The results showed that both, resistance and modules increased linearly with addition amount of cement and exponentially with decreasing of the porosity. The  $\eta/C_{\%}$  ratio proved to be an excellent rational criterion for the evaluation of behavior and prediction of resistance and modulus for all the studied mixtures. The mixtures with RAP presented viscoelastic characteristics derived from the asphalt binder inheritance present in their composition. Finally, the satisfactory performance corroborates the possibility of covering the studies and use of these materials.

**Key-words:** RAP. Cement-aggregate stabilized. Reference. Mechanical properties. Porosity. Volumetric content of cement.  $\eta/C_{\%}$ . Resistance. Stiffness.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Faixas granulométricas sugeridas para execução de BGS .....	28
Figura 2 – Mudanças a longo prazo de indicadores funcionais e estruturais de pavimentos flexíveis com base cimentada .....	35
Figura 3 – Fluxograma da pesquisa .....	49
Figura 4 – Localização do trecho do km 334 na BR-392.....	52
Figura 5 – Vista do trecho e máquina fresadora Wirtgen W 100f.....	52
Figura 6 – Curva granulométrica do RAP.....	53
Figura 7 – Formações geológicas do Estado do RS .....	55
Figura 8 – Curva granulométrica do material pétreo .....	56
Figura 9 – Curva granulométrica das misturas.....	59
Figura 10 – Início do ensaio de compactação Proctor .....	60
Figura 11 – (A) Pesagem; (B) secagem das amostras.....	61
Figura 12 – Curvas de compactação Proctor .....	61
Figura 13 – (A) Mistura dos materiais em betoneira; (B) Proteção contra perda de umidade.....	63
Figura 14 – Moldes utilizados na pesquisa: (A) ensaio RTF; (B) ensaio RTCD/MR; (C) ensaio RCS .....	64
Figura 15 – (A) Compactação ensaio RCS; (B) compactação ensaio RTCD/MR; (C) compactação ensaio RTF.....	64
Figura 16 – Corpos de prova em câmara úmida .....	65
Figura 17 – Capeamento dos corpos de prova 100 x 200 mm.....	66
Figura 18 – Amostra pronta para ensaio de RCS.....	67
Figura 19 – Prensa UTM 25 .....	68
Figura 20 – Condicionamento e amostra pronta para ensaio de MR .....	68
Figura 21 – Tempo de carregamento e repouso ensaio MR .....	69
Figura 22 – Amostra pronta para ensaio de RTCD e CP após ruptura .....	71
Figura 23 – Tela de entrada de dados e interface gráfica de saída dos resultados ..	71
Figura 24 – Configuração para ensaio RTF .....	74
Figura 25 – Vigota pronta para ensaio de RTF e CPs após ruptura.....	75
Figura 26 – Variação da RCS em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura...	79
Figura 27 – Variação da RCS em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura.	79

Figura 28 – Variação da RTF em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura ...	80
Figura 29 – Variação da RTF em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura .	80
Figura 30 – Variação da RTCD em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura	81
Figura 31 – Variação da RTCD em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura .....	81
Figura 32 – Variação do MR 5Hz em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura .....	82
Figura 33 – Variação do MR 5Hz em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura .....	82
Figura 34 – Variação do MR 10Hz em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura .....	83
Figura 35 – Variação do MR 10Hz em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura.....	83
Figura 36 – Variação do MR 25Hz em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura .....	84
Figura 37 – Variação do MR 25Hz em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura.....	84
Figura 38 – Variação da RCS em relação à porosidade para 7 dias de cura .....	87
Figura 39 – Variação da RCS em relação à porosidade para 28 dias de cura .....	87
Figura 40 – Variação da RTF em relação à porosidade para 7 dias de cura.....	88
Figura 41 – Variação da RTF em relação à porosidade para 28 dias de cura.....	88
Figura 42 – Variação da RTCD em relação à porosidade para 7 dias de cura.....	89
Figura 43 – Variação da RTCD em relação à porosidade para 28 dias de cura.....	89
Figura 44 – Variação do MR 5Hz em relação à porosidade para 7 dias de cura .....	90
Figura 45 – Variação do MR 5Hz em relação à porosidade para 28 dias de cura ....	90
Figura 46 – Variação do MR 10Hz em relação à porosidade para 7 dias de cura ....	91
Figura 47 – Variação do MR 10Hz em relação à porosidade para 28 dias de cura ..	91
Figura 48 – Variação do MR 25Hz em relação à porosidade para 7 dias de cura ....	92
Figura 49 – Variação do MR 25Hz em relação à porosidade para 28 dias de cura ..	92
Figura 50 – Variação da RCS versus relação $\eta/C\%$ para 7 dias de cura .....	95
Figura 51 – Variação da RCS versus relação $\eta/C\%$ para 28 dias de cura .....	95
Figura 52 – Variação da RTF versus relação $\eta/C\%$ para 7 dias de cura.....	96
Figura 53 – Variação da RTF versus relação $\eta/C\%$ para 28 dias de cura.....	96

Figura 54 – Variação da RTCD versus relação $\eta/C\%$ para 7 dias de cura .....	97
Figura 55 – Variação da RTCD versus relação $\eta/C\%$ para 28 dias de cura .....	97
Figura 56 – Variação do MR 5Hz versus relação $\eta/C\%$ para 7 dias de cura .....	98
Figura 57 – Variação do MR 5Hz versus relação $\eta/C\%$ para 28 dias de cura .....	98
Figura 58 – Variação do MR 10Hz versus relação $\eta/C\%$ para 7 dias de cura .....	99
Figura 59 – Variação do MR 10Hz versus relação $\eta/C\%$ para 28 dias de cura .....	99
Figura 60 – Variação do MR 25Hz versus relação $\eta/C\%$ para 7 dias de cura .....	100
Figura 61 – Variação do MR 25Hz versus relação $\eta/C\%$ para 28 dias de cura .....	100
Figura 62 – Variação da RCS versus relação $\eta/C\%$ ajustada .....	101
Figura 63 – Variação da RTF versus relação $\eta/C\%$ ajustada .....	102
Figura 64 – Variação da RTCD versus relação $\eta/C\%$ ajustada .....	102
Figura 65 – Variação do MR 5Hz versus relação $\eta/C\%$ ajustada .....	103
Figura 66 – Variação do MR 10Hz versus relação $\eta/C\%$ ajustada .....	103
Figura 67 – Variação do MR 25Hz versus relação $\eta/C\%$ ajustada .....	104
Figura 68 – Variação da RCS versus $\eta/C\%$ compatibilizada .....	112
Figura 69 – Variação da RTF versus $\eta/C\%$ compatibilizada .....	112
Figura 70 – Variação da RTCD versus $\eta/C\%$ compatibilizada .....	113
Figura 71 – Variação da MR 5Hz versus $\eta/C\%$ compatibilizada .....	113
Figura 72 – Variação da MR 10Hz versus $\eta/C\%$ compatibilizada .....	114
Figura 73 – Variação da MR 25Hz versus $\eta/C\%$ compatibilizada .....	114
Figura 74 – Variação do módulo de resiliência versus $\eta/C\%$ compatibilizada .....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre as especificações de execução de BGS.....	29
Tabela 2 – Especificações de execução de BGTC.....	31
Tabela 3 – Faixas granulométricas para execução de BGTC.....	32
Tabela 4 – Valores típicos de RCS aos 7 dias de cura para misturas cimentadas ...	36
Tabela 5 – Valores recomendados de RCS e MRF para camadas cimentadas aos 28 dias de cura .....	36
Tabela 6 – Valores recomendados de RTCD aos 7 dias de cura.....	37
Tabela 7 – Detalhamento e nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa .....	51
Tabela 8 – Teor de betume.....	54
Tabela 9 – Densidade máxima medida.....	54
Tabela 10 – Resultado da média das granulometrias dos agregados .....	56
Tabela 11 – Propriedades dos agregados utilizados nas misturas.....	57
Tabela 12 – Comparativo entre as normas de referência .....	73
Tabela 13 – Relação MR/RTCD .....	107
Tabela 14 – Resultados do ensaio de RTCD e parâmetros de tenacidade, Energias, IT bem como suas médias, DP e CV de cada mistura com teor de cimento de 4%	108
Tabela 15 – Resultados do ensaio de RTCD e parâmetros de tenacidade, Energias, IT bem como suas médias, DP e CV de cada mistura com teor de cimento de 5%	109
Tabela 16 – Resultados do ensaio de RTCD e parâmetros de tenacidade, Energias, IT bem como suas médias, DP e CV de cada mistura com teor de cimento de 6%	110
Tabela 17 – Potências X de cada ensaio e potência X ajustada .....	111



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BGS	Brita graduada simples
BGTC	Brita graduada tratada com cimento
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
CV	Coeficiente de variação
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DMM	Densidade máxima medida
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DP	Desvio padrão
FP	Mistura 70% fresado 30% pó de pedra
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
g	Gramas
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
GC	Grau de compactação
IECA	<i>Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones</i>
IP	Índice de plasticidade
IT	Índice de tenacidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
kg/m <sup>3</sup>	Kilograma por metro cúbico
km	Kilometro
kN/s	KiloNewton por segundo
kPa/min	KiloPascal 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/min	Milímetros por minuto
mm/s	Milímetros por segundo
MPa	MegaPascal
MR	Módulo de resiliência
MRF	Módulo de resiliência flexural
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RCS	Resistência à compressão simples
REF	Mistura Referência (BGTC)

RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à tração
RTCD	Resistência à compressão por tração diametral
RTF	Resistência à tração na flexão
SARA	<i>South African Roads Agency</i>
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
$\omega$	Teor de umidade
$\eta$	Porosidade
$\eta/C_{\%}$	Índice porosidade/teor volumétrico de cimento
$C_{\%}$	Teor volumétrico de cimento
$\gamma_d$	Massa específica aparente seca
$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus
$\xi_{FP}$	Relação RTCD/RCS para mistura FP
$\xi_{REF}$	Relação RTCD/RCS para mistura REF
$\delta_{FP}$	Relação RTF/RCS para mistura FP
$\delta_{REF}$	Relação RTF/RCS para mistura REF
$\zeta_{FP}$	Relação RTF/RTCD para mistura FP
$\zeta_{REF}$	Relação RTF/RTCD para mistura REF

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1	OBJETIVO GERAL .....	24
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
1.3	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA.....	25
<b>2</b>	<b>CAMADAS DE BASE PARA PAVIMENTOS</b> .....	26
2.1	BASE GRANULAR – BRITA GRADUADA SIMPLES.....	26
2.1.1	<b>Caracterizações físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade</b> .....	27
2.2	BASE CIMENTADA – BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO .....	29
2.2.1	<b>Caracterizações físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade</b> .....	31
2.3	BASE CIMENTADA – RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	32
2.3.1	<b>Fatores de controle de bases recicladas com cimento</b> .....	33
2.3.2	<b>Comportamento mecânico de camadas cimentadas</b> .....	34
2.3.3	<b>Caracterização mecânica das misturas recicladas com cimento</b> ....	35
2.3.4	<b>Normas e técnicas nacionais sobre reciclagem com cimento</b> .....	37
2.3.5	<b>Vantagens e desvantagens da técnica de reciclagem com cimento</b> .....	38
2.3.6	<b>Dosagem de misturas recicladas com cimento</b> .....	39
2.3.6.1	<i>Normatização Nacional</i> .....	39
2.3.6.2	<i>Experiência Internacional</i> .....	39
2.3.6.2.1	Método de dosagem da Portland Cement Association.....	40
2.3.6.2.2	Método de dosagem da Wirtgen .....	40
2.3.6.2.3	Método de dosagem da Austroads.....	41
2.4	PESQUISAS RECENTES SOBRE A RECICLAGEM COM CIMENTO ..	41
2.4.1	<b>Pesquisas realizadas nacionalmente</b> .....	42
2.4.2	<b>Pesquisas realizadas no exterior</b> .....	44
2.5	RELAÇÕES ENTRE TEOR DE VAZIOS E CIMENTO .....	46
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	49
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA .....	49
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS .....	51
3.2.1	<b>Material fresado asfáltico</b> .....	51
3.2.2	<b>Agregados</b> .....	55
3.2.3	<b>Cimento</b> .....	57
3.2.4	<b>Água</b> .....	57
3.3	PROCEDIMENTOS.....	58
3.3.1	<b>Dosagem e mistura</b> .....	58
3.3.2	<b>Compactação Proctor</b> .....	59
3.3.3	<b>Moldagem, cura e aceitação dos corpos de prova</b> .....	62
3.3.4	<b>Resistência à compressão simples (RCS)</b> .....	65
3.3.5	<b>Módulo de resiliência (MR)</b> .....	67
3.3.6	<b>Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)</b> .....	70
3.3.7	<b>Resistência à tração na flexão (RTF)</b> .....	72
3.3.8	<b>Determinação da porosidade, teor volumétrico de cimento e correlações da <math>\eta/C\%</math> com parâmetros de rigidez e resistência</b> .....	75
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	78

4.1	EFEITO DO TEOR DE CIMENTO .....	78
4.2	EFEITO DA POROSIDADE .....	86
4.3	RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO .....	94
4.4	RELAÇÃO MR/RTCD .....	105
4.5	TENACIDADE, ÍNDICE DE TENACIDADE E ENERGIA DE FRATURA .....	107
4.6	CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS .....	110
4.7	MATERIAL FRESADO VERSUS AGREGADO NATURAL.....	118
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	119
5.1	CONCLUSÕES.....	119
5.1.1	<b>Quanto à influência da quantidade de cimento</b> .....	119
5.1.2	<b>Quanto ao efeito da porosidade</b> .....	120
5.1.3	<b>Relação porosidade/teor volumétrico de cimento</b> .....	121
5.1.4	<b>Relação MR/RTCD</b> .....	121
5.1.5	<b>Correlações entre os resultados</b> .....	122
5.1.6	<b>Material fresado <i>versus</i> agregado natural</b> .....	123
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	125
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RCS: MISTURA FP</b> .....	134
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RCS: MISTURA REF</b> .....	135
	<b>APÊNDICE C – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RTF: MISTURA FP</b> .....	136
	<b>APÊNDICE D – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RTF: MISTURA REF</b> .....	137
	<b>APÊNDICE E – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RTCD E MR: MISTURA FP</b> .....	138
	<b>APÊNDICE F – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RTCD E MR: MISTURA REF</b> .....	140

## 1 INTRODUÇÃO

Muitas vezes, a efetiva relevância que os transportes exercem na sociedade acaba sendo negligenciada. A forma como pessoas, produtos ou serviços são escoados de sua origem até seu destino está estritamente relacionada com o modal de transporte utilizado. O transporte exerce papel fundamental no progresso social e econômico mundial e está qualificado como uma das indústrias mais importantes do mundo, seja do ponto de vista econômico, militar ou político.

No Brasil, o modal rodoviário está difundido como a mais importante infraestrutura de transporte para cargas e passageiros. Uma vez que, os demais modais não têm seu devido desenvolvimento, as rodovias do país transportam 61% das cargas e mais de 95% dos passageiros (CNT, 2017). Sendo assim, a excessiva degradação da malha rodoviária está relacionada a um conjunto de fatores, podendo-se citar a ausência de manutenção no momento adequado, o excesso de cargas que geram elevadas solicitações e a idade elevada dos pavimentos.

Em 2017, a Confederação Nacional dos Transportes (CNT) identificou 52.911 km correspondentes a 50% da extensão total avaliada com algum tipo de problema no pavimento, sendo 34,0% classificados como regular, 13,2% como ruim e 2,8% péssimo. A melhoria das condições dessas vias é de suma importância para a comunidade, visto que os cidadãos necessitam o mínimo acesso as condições de saneamento básico, transporte e habitação para que seu país consiga crescer com o desenvolvimento necessário.

É fato que os procedimentos clássicos de concepção ou restauração de rodovias utilizam variados processos de construção que estimulam a utilização de matéria-prima virgem. Conseqüentemente, há um aumento substancial na geração de resíduos, os quais poderiam ser apropriadamente reciclados e que, apesar disso, constantemente, tem seu descarte inadequado.

Neste cenário, uma alternativa favorável à disposição final do material fresado, na literatura internacional chamado de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), originados dos processos de conservação e/ou restauração dessas rodovias, seria se tornar em matéria-prima para a elaboração de novas camadas de pavimento. A reutilização do RAP em novas camadas de pavimento tem como finalidade obter um valor econômico reduzido, aumentar a capacidade de carga, reduzir o consumo de

materiais novos e conseqüentemente resultando numa proteção aos recursos naturais do meio ambiente (MOREIRA *et al.*, 2003).

Muitas pesquisas acerca da reciclagem de pavimento com utilização de cimento Portland vêm sendo realizadas no âmbito nacional e internacional. Sendo que os resultados demonstram melhoras significativas nos parâmetros do material fresado quando estabilizado granulometricamente e quimicamente.

No Brasil, apesar das diversas aplicações, ainda não existem metodologias de dosagem e projeto das misturas de material fresado estabilizados baseadas em critérios racionais como os utilizados, por exemplo, no concreto convencional. Onde a relação água/cimento desempenha papel primordial na obtenção da resistência desejada.

Sendo assim, torna-se premente que as pesquisas avancem no sentido de identificar e quantificar as variáveis mais importantes no controle da resistência de materiais oriundos da fresagem de pavimentos artificialmente tratados com pó de pedra e cimento. Fornecendo assim, subsídios para que, através do manejo adequado de tais variáveis por meio de dosagem, se possa atingir de forma concreta e com maior confiabilidade as propriedades requeridas; tal como, auxiliar nos estudos sobre o comportamento e desempenho desses novos materiais.

Nesse contexto, este trabalho visou avaliar a reutilização do RAP estabilizado com rocha basáltica pulverizada e com um agente cimentante, com a finalidade de utilizar essas misturas em camadas de pavimentos. Por meio dos resultados obtidos, correlacionar o índice porosidade/teor volumétrico de cimento ( $\eta/C_{\%}$ ) com parâmetros de rigidez e resistência das misturas. A partir de tais relações obtidas por meio de dosagem, atingiu-se de forma objetiva e com maior confiabilidade as propriedades necessárias de resistência e rigidez que está submetida uma camada de base para pavimentos.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa possui o objetivo principal de avaliar as principais propriedades que afetam mecanicamente as misturas de 70% material fresado estabilizado com 30% pó de pedra e misturas de brita graduada tratada com cimento (BGTC).

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo principal, este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar e avaliar, do ponto de vista do efeito do teor de cimento, da porosidade e a relação porosidade/teor volumétrico de cimento Portland as propriedades físicas e mecânicas das misturas;
- b) correlacionar o índice  $\eta/C_{\%}$  com as propriedades físicas e mecânicas das misturas para estimar suas resistências e rigidez;
- c) comparar os resultados encontrados nas misturas com matriz pétreia de 70% material fresado 30% pó de pedra com a matriz pétreia da BGTC.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos propostos, a dissertação está organizada em capítulos conforme segue.

O Capítulo 1, tem a função de introduzir ao tema, apresentar os objetivos e descrever a pesquisa.

O Capítulo 2 versa sobre a revisão de literatura de alguns temas relevantes para estudo da estabilização de misturas cimentadas e metodologias de dosagem e projeto, assim como de trabalhos desenvolvidos no âmbito nacional e internacional.

O Capítulo 3 trata do planejamento, dos materiais e de métodos de ensaios aplicados para o estudo, visando atingir os objetivos.

No Capítulo 4 estão dispostos os resultados obtidos nos ensaios realizados e sua discussão referente a propriedade analisada, bem como as comparações entre as diferentes misturas utilizados.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Esta dissertação possui ainda apêndices com resultados de ensaios.

## 2 CAMADAS DE BASE PARA PAVIMENTOS

Este capítulo abordará os principais assuntos referentes à elaboração e desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente, foi realizado um estudo acerca dos materiais granulares corriqueiramente utilizados em camadas de pavimento, seguido de conceitos, comportamentos e normativas sobre a reciclagem empregando cimento Portland, além de sintetizar alguns estudos já realizados a respeito do assunto. Por fim, trata-se da relação  $\eta/C_{\%}$ .

Primeiramente, por se tratar da mistura utilizada como referência para esta pesquisa, realizou-se um estudo relativo a brita graduada tratada com cimento (BGTC). Assim como a brita graduada simples (BGS) por ser uma mistura de material britado com granulometria bem graduada e semelhante à BGTC.

Na segunda parte, estuda-se a reciclagem numa esfera geral, contemplando a técnica com adição de cimento Portland. Abordando-se assuntos referentes as vantagens e desvantagens da reciclagem de pavimentos, caracterização e comportamento mecânico, normas nacionais e internacionais e procedimentos de dosagem de misturas recicladas com cimento.

Segue a revisão bibliográfica com resumos de estudos apresentados por pesquisadores internacionais e nacionais sobre a reciclagem de pavimentos com cimento. Por fim, finaliza-se com o estudo referente a relação  $\eta/C_{\%}$  onde se obtém a equação utilizada na pesquisa para calcular a porosidade dos corpos de prova.

### 2.1 BASE GRANULAR – BRITA GRADUADA SIMPLES

A técnica de utilização de materiais granulares em estradas remonta milhares de anos, surgindo da necessidade de se estabelecer ligação por vias comerciais entre as comunidades. O Império Romano, há mais de dois mil anos, já construía pavimentos divididos em camadas. O método utilizado pelos mesmos perdurou até meados de 1775, quando Tresaguet na França, acabou modificando o método introduzindo uma camada drenante na superfície (HAAS *et al.*, 1994).

O engenheiro escocês Mac-Adam (1756-1836) é apontado como o precursor do modelo de pavimentos modernos, dado que seu método se baseava na compactação das camadas, embricamento das partículas granulares e preservação



de camada drenante. Atualmente, este material foi denominado de macadame. Apesar de Mac-Adam desejar a densificação dos materiais, a utilização de rolo só iniciou em 1869 na cidade de Nova York (HAAS *et al.*, 1994).

Telford na Inglaterra, em 1816, para obter pavimentos impermeáveis que evitavam a perda de resistência, usou materiais granulares bem graduados que aumentavam o intertravamento dos grãos do macadame através do preenchimento dos vazios por finos (LAY, 1992).

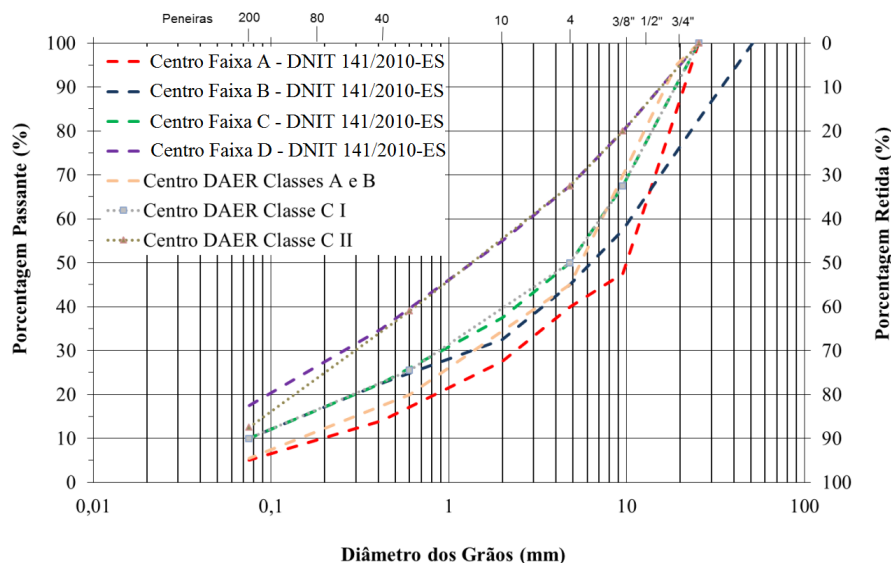
Atualmente, muitos projetos de pavimentação indicam o uso de BGS em camadas de base e sub-base de pavimento. Fato que se deve principalmente por essas bases quando compactadas e confinadas de maneira correta, acarretarem em uma elevada resistência aos esforços verticais (relacionada ao esqueleto mineral intertravado que surge através da boa graduação e densificação), drenagem apropriada para a estrutura e devido as grandes reservas de rocha vulcânica presentes em várias regiões do país.

### **2.1.1 Caracterizações físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade**

Em geral, as normativas que especificam a execução de base e sub-base de BGS atentam para parâmetros de qualidade do material, envolvendo características físicas, químicas e de propriedades mecânicas. A qualidade do material é avaliada a partir de 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.

Complementado, temos um dos critérios mais importantes para a BGS, sua granulometria. Dada importância se justifica, pois, é a característica responsável por parte do intertravamento granular, sendo expressa em geral por faixas granulométricas. A Figura 1 traz o centro das faixas granulométricas apresentadas nas especificações do DNIT 141/2010-ES e DAER – Especificações Gerais.

Figura 1 – Faixas granulométricas sugeridas para execução de BGS



Fonte: Autor.

As faixas granulométricas são fundamentadas pelos estudos de Fuller e Thompson (1907) e Talbot e Richard (1923). Obedecendo a Equação 1, foram desenvolvidas as granulometrias que apresentam elevada densidade para concretos de cimento Portland. Além disso, estabelecem critérios de proporção entre 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 Tabela 1 traz um comparativo entre algumas das principais especificações dos materiais usados para execução da BGS, segundo o 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).

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: Autor.

No Brasil, para o dimensionamento da estrutura de um pavimento, se emprega em geral o ensaio *California Bearing Ratio* (CBR), traduzido no país como Índice de Suporte Califórnia, ISC (DNIT 172/2016-ME), que mede a qualidade dos materiais granulares através da resistência à penetração. A BGS quando corretamente misturada e compactada apresenta CBR = 100%, logo as britas graduadas serviram como material padrão para a realização do ensaio CBR (BALBO, 2007).

Contudo, nas últimas décadas, vem sendo realizadas análises mecanicistas em diversos projetos de pavimentos. Com isso há a realização de ensaios de deformabilidade no lugar dos ensaios de resistência, que em geral é determinado o módulo de resiliência (DNIT 134/2010-ME) da BGS. Esse módulo está na faixa de 100 a 400 MPa (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A BGS ainda pode ser utilizada com a finalidade de retenção e amortecimento de picos de enchentes em zonas urbanas (VIRGILLIS, 2009). Esse fato está relacionado com bases granulares de graduação mais aberta (embora a maior parte das bases granulares de BGS busquem uma distribuição granulométrica próxima à máxima densidade), de modo a serem mais permeáveis.

## 2.2 BASE CIMENTADA – BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Os pavimentos executados com bases estabilizadas com aglomerantes hidráulicos se caracterizam como pavimentos semirrígidos. 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 (BALBO, 2007).

A mistura granulométrica da BGTC se assemelha à utilizada na BGS, com adição de 3% a 5% em peso de cimento Portland. Para que alcance a resistência e durabilidade pretendida, é importante que a camada seja compactada no mínimo em 95% da energia modificada (BERNUCCI *et al.*, 2008). 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. Sabe-se que a estabilização não é suficiente para envolver completamente os agregados como ocorre no concreto, conseqüentemente há somente a formação de pontes entre os agregados (BALBO, 2007).

O histórico de utilização de aglomerantes hidráulicos remete as primeiras estradas construídas na Roma antiga. Onde se utilizavam cal ou cinzas pozolânicas para estabilizar as areais e argilas formando materiais granulares que serviam de base para as estradas. O atual método de aglomeração de materiais granulares utilizando cimento Portland para estabilizar solos se deu no Reino Unido a partir de 1917, contudo foi em 1944 que surgiu a primeira especificação para execução de concreto magro como base de pavimentos (BOLIS; DI RENZO, 1949; ANDREWS, 1955 *apud* BALBO, 1993).

O uso da BGTC no Brasil se acentuou no final da década de 1970 e sua principal utilização está em pavimentos de vias de alto volume de tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2008). Entre as primeiras obras realizadas pode-se citar a Rodovia dos Imigrantes (1974), a Rodovia dos Bandeirantes (1978) e a Rodovia dos Trabalhadores (1982) – hoje denominada Rodovia Ayrton Senna (BALBO, 1993).

O dimensionamento destas obras seguiu os 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.

Uma técnica utilizada na pavimentação para evitar a reflexão de trincas de retração e de fadiga da camada cimentada (BGTC) para o revestimento asfáltico é utilizar estruturas chamadas de Pavimentos Semirrígidos Invertidos (em inglês

denominados de *Upside-down*). Corriqueiramente a estrutura do pavimento é executada de tal forma que o MR das camadas vai decrescendo com o aumento da profundidade. Utilizando Pavimentos Semirrígidos Invertidos, a lógica de que os materiais mais nobres ou mais resistentes estão posicionados nas camadas superiores é modificada. Dado que 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 em consequência da rigidez da sub-base ser bem superior à da base, acarretando uma maior tensão confinante ( $\sigma_3$ ) sobre a BGS que apresenta deformabilidade muito sensível ao confinamento (SUZUKI, 1992).

Contudo, apesar da larga utilização da BGTC em projetos de pavimentos, Balbo (2006) considera que a incorporação de BGTC nas estruturas de pavimentos para rodovias de tráfego pesado é antiquada e inconsistente, em consequência da heterogeneidade na sua matriz, responsável pela geração de poros e descontinuidades em sua estrutura interna. Assim, a BGTC oferece baixíssima resistência à fratura, tornando-se muito vulnerável ao fenômeno de fadiga.

### 2.2.1 Caracterizações físicas, químicas, de resistência e de deformabilidade

Para a execução de camadas com mistura de BGTC as normativas estabelecem critérios em relação aos agregados, cimento Portland e água. Em relação aos agregados, segue-se a mesma metodologia de ensaios físico-químicos utilizados na BGS. A Tabela 2 traz algumas das principais especificações dos materiais usados para execução da BGTC e a Tabela 3 apresenta as faixas granulométricas, segundo a NBR 11803 (ABNT, 2013).

Tabela 2 – Especificações de execução de BGTC

Ensaio	NBR 11803 (ABNT, 2013)
Abrasão Los Angeles	< 40%
Equivalência de Areia	> 35%
Índice de forma	$\leq 2$
Durabilidade: Sulfato de Sódio	< 20%
Sulfato de Magnésio	< 30%

Fonte: Adaptado da NBR 11803 (ABNT, 2013).

Tabela 3 – Faixas granulométricas para execução de BGTC

Peneira de malha quadrada		Passante (%)	
		ABNT	
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 (ABNT, 2013).

A DNER-ME 036/1994 estabelece os critérios para utilização do cimento Portland para execução da BGTC, contudo deve-se atentar para as normas específicas de acordo com o tipo de cimento Portland incorporado a mistura. Segue-se as normas NBR 5732 (ABNT, 1991) quando utilizado cimento Portland comum (CP I), NBR 11578 (ABNT, 1997) para o emprego de cimento composto (CP II), NBR 5735 (ABNT, 1991) quando empregado cimento Portland de alto forno (CP III), NBR 5736 (ABNT, 1999) para utilização de cimento pozolânico (CP IV) e NBR 5733 (ABNT, 1991) quando empregado cimento Portland de alta resistência inicial (CP V). Além disso, a água utilizada nas misturas de BGTC deve ser considerada potável e estar isenta de matéria orgânica ou outras substâncias prejudiciais à hidratação do cimento.

## 2.3 BASE CIMENTADA – RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

De acordo com a *Portland Cement Association* (PCA, 2010), a técnica de reciclagem de pavimentos com inclusão de cimento Portland consiste na trituração do revestimento asfáltico, simultaneamente com camadas inferiores. Essa fresagem geralmente atinge a camada de base e, eventualmente, a sub-base. O material resultante é misturado com cimento e novamente compactado, gerando-se nova camada de base estabilizada. Essa nova camada apresentará maior

homogeneidade, resistência e propiciará um melhor desempenho em relação ao pavimento original, proporcionando maior durabilidade e menores custos de manutenção.

Apesar de não ser uma técnica nova, ainda não existem metodologias de dosagem normatizadas no Brasil. Contudo, o DNIT (2006) prescreve que a técnica pode ser utilizada em rodovias de baixo tráfego, acostamentos defeituosos de rodovias principais e na utilização do material reciclado como base estabilizada.

### **2.3.1 Fatores de controle de bases recicladas com cimento**

O desempenho da mistura é analisado a partir de sua estabilidade granulométrica e dos parâmetros relacionados à compactação, umidade ótima e tempo de cura. Sendo que as bases cimentadas apresentam comportamento predominantemente não coesivo, isso se deve pelo acréscimo de rigidez oriunda do cimento (PAIVA; OLIVEIRA, 2014).

A estabilidade é atingida a partir da utilização de faixas granulométricas as quais são escolhidas de acordo com a metodologia de dosagem empregada (FEDRIGO, 2015; KLEINERT, 2016). Para material fresado, a Wirtgen (2012) relaciona os fatores que influenciam a granulometria com a condição do asfalto *in situ* (composição e uniformidade do material) e pela operação de fresagem (profundidade, velocidade, sentido de corte). Neste sentido, o controle da operação de reciclagem ocorre na granulometria da mistura.

Os parâmetros de moldagem para a compactação das misturas recicladas seguem as normativas: DNIT 167/2013-ES; PCA (2007) e WIRTGEN (2012), buscando sempre um aumento de resistência a partir do incremento do grau de compactação para o mesmo teor de cimento (PCA, 2010). No Brasil, a norma mais recente de reciclagem estabelece a utilização de 98% da energia modificada do ensaio de Proctor (DNIT 167/2013-ES). Sendo assim, os parâmetros de compactação são decisivos para a resistência das misturas.

A PCA (2010) observa que a quantia de água e cimento a ser utilizado na compactação está relacionada a resistência de projeto e as características granulométricas. A granulometria estabelece relação com o tipo de mistura, por

exemplo, em uma mistura fina há um aumento da superfície específica das partículas, necessitando assim de mais aglomerante hidráulico e água.

O tempo de cura está diretamente relacionado ao ganho de resistência, causado pela adição de cimento a mistura. A PCA (2007) relata experiências nos Estados Unidos, onde ocorreu trincamento das camadas recicladas quando houve liberação do tráfego em estágios iniciais de cura. Nesta perspectiva, algumas técnicas (“*microcracking*” ou microfissuração, induzida por compactação) que visam reduzir a reflexão de trincas estão sendo desenvolvidas. Entretanto, esses efeitos ainda não podem ser avaliados e conseqüentemente os tempos de cura de 7 e 28 dias acabam sendo utilizados como padrões de execução e desempenho. Já a abertura ao tráfego segue a especificação adotada.

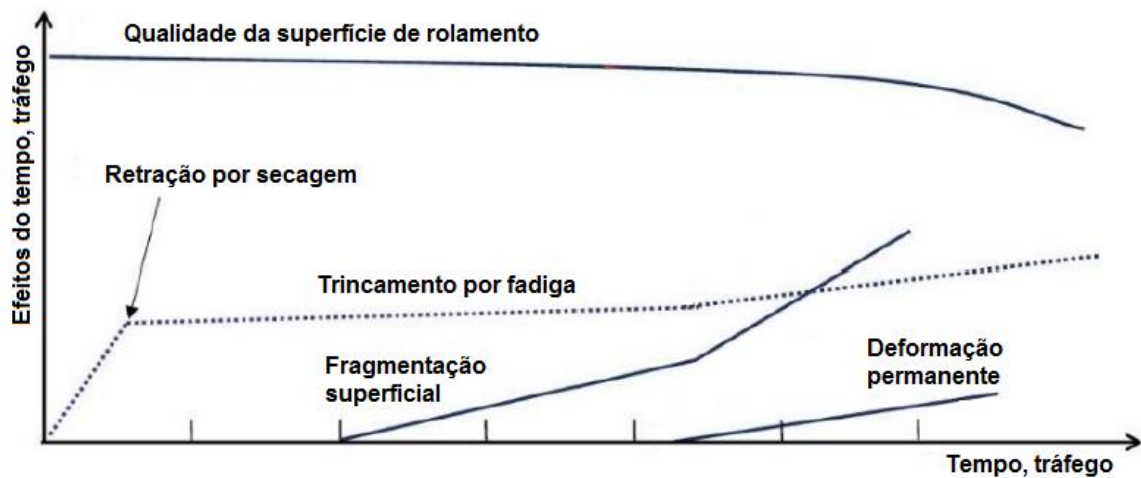
### **2.3.2 Comportamento mecânico de camadas cimentadas**

De acordo com as propriedades mecânicas a serem melhoradas, há diferentes tipos de agentes estabilizadores para se utilizar quando se faz uso da técnica de reciclagem profunda de pavimentos. O cimento Portland age na mistura que compõem a base reciclada aumentando a resistência a tração e compressão, isso torna a camada menos dependente do estado de tensões (WIRTGEN, 2012).

Segundo Aranha (2013), ocorrem mudanças estruturais e funcionais durante o tempo de projeto de um pavimento flexível quando há a utilização de camada cimentada. Com o emprego de uma base reciclada tais mudanças são determinadas por processos de deformação permanente, fragmentação superficial e reflexão de trincas que estão associadas à retração por secagem e ao trincamento por fadiga, conforme apresentado pela SARA “*South African Roads Agency*” (2013), como ilustrado na Figura 2.



Figura 2 – Mudanças a longo prazo de indicadores funcionais e estruturais de pavimentos flexíveis com base cimentada



Fonte: Adaptado SARA (2013).

Verifica-se a fragmentação superficial na superfície da camada cimentada quando há esforços superiores a resistência à compressão do material. A Wirtgen (2012) relata que a capacidade de produção deste tipo de fratura é função da resistência à compressão da camada, da espessura e da pressão dos pneus.

Observa-se também da Figura 2 que a reflexão de trincas ocorre no período inicial de trabalho, associado à ocorrência de retração inerente à estabilização com cimento. A longo prazo, relaciona-se ao processo de fadiga, devido as cargas repetidas do tráfego.

O estado avançado de deterioração pode fazer com que a camada cimentada se comporte como material granular, que é uma prolongação do dano de fadiga. Contudo, a deformação permanente permanece suscetível a ocorrer em qualquer momento, devido principalmente pela combinação de mecanismos de fratura.

### 2.3.3 Caracterização mecânica das misturas recicladas com cimento

Para a dosagem das misturas com cimento, os métodos adotam dois ensaios de caracterização mecânica que buscam atender os seguintes mecanismos de ruptura: resistência à compressão e tração. A resistência à compressão é o principal meio de avaliação das misturas recicladas. Sua verificação se dá através do ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura, sendo esse um critério de

avaliação mais estendido. De acordo com o método utilizado, são determinados limites (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores típicos de RCS aos 7 dias de cura para misturas cimentadas

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 167/2013-ES	2,1	2,5

Fonte: Autor.

A Austroads (2002) define os níveis de cimentação das misturas em função da sua resistência à compressão, ampliando-o em função do comportamento resiliente, conforme Tabela 5. Vorobieff e Wilmot (2001) relatam que a problemática envolvida na adoção de um módulo de resiliência flexural constante, está relacionado a falta de informações que leva ao uso de relações conservadoras e sua relevância, especialmente para camadas espessas.

Tabela 5 – Valores recomendados de RCS e MRF para camadas cimentadas aos 28 dias de cura

Nível de cimentação do material	Teor de cimento (%)	RCS (MPa)	Módulo de resiliência (MPa)
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 Austroads (2002).

O valor mínimo de RCS estipulado pelas normativas é para assegurar o apropriado suporte ao tráfego estimado e reduzir os riscos de ruptura por fragmentação superficial. Já o valor limite busca restringir a reflexão de trincas por retração e fadiga e também reduzir a susceptibilidade a presença de água, responsável por mudanças volumétricas. Entretanto, o principal motivo para se limitar a resistência é evitar que a mistura se torne quebradiça e reduzir o fenômeno de reflexão de trincas (PCA, 2005).

A resistência a flexão da camada cimentada é avaliada pois a base reciclada apresenta comportamento de um pavimento semirrígido. Desta maneira, a base trabalha sobre compressão no topo enquanto as fibras inferiores são sujeitadas a tensões de flexão (SEVERI *et al.*, 1999). No Brasil, avalia-se a resistência a tração por meio do ensaio de Resistência à tração por compressão diametral (RTCD), conforme Tabela 6. O valor mínimo de 0,25 MPa recomendado, conforme Wirtgen (2012), funciona para impedir a desintegração da mistura que ocorre pelas mudanças volumétricas decorrentes do processo.

Tabela 6 – Valores recomendados de RTCD aos 7 dias de cura

Autor	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	
	Min	Máx.
WIRTGEN (2012)	0,25	--
DNIT 167/2013-ES	0,25	0,35

Fonte: Autor.

### 2.3.4 Normas e técnicas nacionais sobre reciclagem com cimento

No Brasil, há apenas especificações de serviço referentes a reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland. Essas especificações foram desenvolvidas pelos Departamentos de Estradas de Rodagem (DER) dos estados do Paraná e São Paulo e pelo Departamento de Infraestrutura de Transporte (DNIT). Tais especificações são listadas a seguir:

- a) DER-PR ES-P 33/05 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento (DER-PR, 2005);
- b) DER-SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita (DER-SP, 2006);
- c) DNIT 167/2013-ES – Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço (DNIT, 2013a).

### 2.3.5 Vantagens e desvantagens da técnica de reciclagem com cimento

Na reabilitação de pavimentos, a técnica de reciclagem traz diversas vantagens associadas há fatores técnicos, ambientais e econômicos. As principais são descritas a seguir:

- a) os custos energéticos (produção e transporte) são reduzidos consideravelmente, dado que há redução da exploração de materiais virgens e conseqüentemente um aumento da vida útil das reservas naturais. Somando-se, há redução dos passivos ambientais relacionados ao descarte indevido do RAP. Tais condições possibilitam a redução de custos que em alguns casos chegam aos 50%, como apontado pela PCA (2007);
- b) o *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones* (IECA, 2013) afirma, que a restauração de um pavimento degradado através da reciclagem, cria uma nova camada com características mecânicas superiores e com melhor capacidade de suporte o que reduz as tensões no topo do subleito e no revestimento asfáltico;
- c) redução do tempo de construção, beneficiando os usuários da via e impactando no custo da obra (WIRTGEN, 2012). Redução dos riscos de exposição das camadas inferiores do pavimento ao tempo e tráfego durante a construção (ELLIS, 2002).

Contudo, a técnica apresenta algumas limitações no seu uso que acabam gerando desvantagens; conseqüentemente se deve realizar um estudo para analisar se é viável utilizar a reciclagem. Dentre essas, salienta-se:

- a) com a utilização do cimento Portland na mistura, há um acréscimo significativo de resistência da camada, gerando assim maiores tensões de carga de roda, o que acarreta uma maior proliferação de trincas, visto que a camada cimentada está sujeita ao fenômeno de fadiga, podendo assim reduzir o desempenho estrutural do pavimento (WIRTGEN, 2012);
- b) indispensabilidade de realizar ensaios de laboratório no estágio inicial, a fim de certificar a viabilidade da técnica (JASIENSKI; RENS, 2002);
- c) dificuldade de reproduzir em campo os parâmetros estabelecidos nos projetos de dimensionamento, dada a variabilidade de espessuras e materiais

das camadas da estrutura a recuperar, refletindo numa heterogeneidade do material fresado (PAIVA; OLIVEIRA, 2014).

### **2.3.6 Dosagem de misturas recicladas com cimento**

As metodologias de dosagem para misturas recicladas com adição de cimento Portland serão tratadas neste item. Procura-se sintetizar os métodos utilizados nacionalmente e internacionalmente com o propósito de analisar as variáveis sobre as quais estão fundamentados tais procedimentos.

#### *2.3.6.1 Normatização Nacional*

Atualmente, não há no Brasil um procedimento de dosagem a respeito da reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland, contudo há especificações de serviço como já mencionados no item 2.3.4. Tais especificações apresentam alguns parâmetros específicos que devem ser seguidos para utilização de misturas recicladas. Contudo, em relação às orientações para dosagens, as especificações de serviço trazem, de forma modesta, as seguintes indicações:

- a) a recicladora deve retirar amostras de cada segmento homogêneo encontrado na rodovia. E a partir disso, deve-se realizar o projeto específico de dosagem para cada variabilidade encontrada em campo;
- b) o projeto de dosagem deve conter informações mínimas referentes à composição granulométrica da mistura e faixa de trabalho, massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo da mistura, energia de compactação a ser empregado e RCS aos 7 dias de cura.

#### *2.3.6.2 Experiência Internacional*

No âmbito internacional, existem diversas metodologias de dosagens de misturas recicladas com cimento. Optou-se por sintetizar três destas técnicas, a escolha dessas se deu por trazerem procedimentos de dosagem bastante minuciosos em relação as demais.

### 2.3.6.2.1 Método de dosagem da Portland Cement Association

Para a PCA (2005) duas características essenciais devem ser analisadas para dosagem de misturas recicladas com cimento. Primeiramente remete a análise granulométrica, esta deve estar enquadrada na faixa especificada pela organização e não deve haver porcentagem de RAP superior a 50% da massa total da mistura na composição. E por fim, deve-se analisar os resultados do ensaio de RCS das composições.

Após ajustada a curva granulométrica, deve-se executar o ensaio de compactação na energia normal. Através dos parâmetros obtidos no ensaio de compactação, moldam-se dois corpos de prova para três teores de cimento e tempo de cura de 7 dias, obtendo assim a resistência à compressão simples.

Com os resultados da RCS, define-se o teor ideal de cimento que atinja os parâmetros de resistência estabelecidos pela PCA (2005), os quais variam entre 2,1 e 2,8 MPa. Por fim, realiza-se novamente a compactação da mistura para determinação dos parâmetros que serão utilizados como fatores de controle no procedimento de campo.

### 2.3.6.2.2 Método de dosagem da Wirtgen

O procedimento de dosagem proposto pelo Manual de Reciclagem a Frio da Wirtgen (2012) propõe um método bastante detalhista. Deve-se retirar no mínimo 100kg de cada material do campo, para posteriormente analisar suas propriedades individualmente e como mistura.

Iniciando com os 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 a devida correção granulométrica. Além disso, o manual não estabelece uma porcentagem máxima de RAP a ser utilizado na composição.

Realizam-se ensaios de limites de Atterberg visando à determinação do índice de plasticidade (IP) dos materiais e ensaio de compactação na energia modificada. O manual ressalta que a porcentagem de cimento deve ser coerente com o material

coletado e que se deve esperar uma hora para realizar a compactação, este tempo de espera visa reproduzir possíveis atrasos *in loco*.

A partir dos parâmetros de compactação, moldam-se três CPs para cada teor de cimento (mínimo três), e se realiza o ensaio de RCS e RTCD aos 7 dias de cura. Outra observação do manual é que os CPs devem ser imersos em água por 4 horas antes de realizar o ensaio de RCS.

Baseado nos resultados da RCS e teor de cimento correlacionam-se os mesmos e se define o teor ideal de cimento a ser adotado. Esse teor está relacionado com o tipo de material, se for levemente cimentado deve apresentar RCS < 4 MPa, e se for cimentado deve apresentar RCS entre 4 a 10 MPa.

#### 2.3.6.2.3 Método de dosagem da Austroads

A Austroads (2002) que é o principal órgão rodoviária da Austrália e Nova Zelândia, desenvolveu um método bastante completo de dosagem de materiais estabilizados com cimento para aplicação em pavimentos. Primeiramente se faz a análise granulométrica da mistura e se determina o índice de plasticidade com a finalidade de verificar se é indicada a estabilização com cimento. Em seguida, caracterizam-se as misturas a partir do ensaio de compactação na energia normal e modificada sem adição de cimento. Com os parâmetros definidos realiza-se a análise do comportamento mecânico, verificando-se RCS dos CPs com 28 dias de cura (Tabela 5). Além disso, deve-se averiguar a taxa de ganho da RCS entre os 7 e 28 dias de cura.

Alguns ensaios extras são sugeridos, tendo em vista diminuir os riscos dos danos à camada reciclada que são provocados pela umidade, as trincas indesejadas e também pela erosão. Entre os ensaios têm-se: ascensão capilar, expansão e absorção; retração por secagem e erodibilidade.

## 2.4 PESQUISAS RECENTES SOBRE A RECICLAGEM COM CIMENTO

O item abordará o comportamento e alguns estudos já realizados a respeito da reciclagem de pavimentos com adição de cimento. Também servirá como banco de dados para futuras comparações de resultados encontrados neste trabalho.

Ressalta-se que se optou por pesquisas que havia verificações e ensaios relacionados com esta dissertação. Na sequência estão apresentados os resultados obtidos a partir de pesquisas realizadas nacionalmente, e posteriormente os estudos elaborados em outros países.

#### **2.4.1 Pesquisas realizadas nacionalmente**

Oliveira *et al.* (2005) descreveram em sua pesquisa o processo de reciclagem de 22km do pavimento da rodovia SP-351 no trecho entre Bebedouro e Palmares Paulista. A espessura média de reciclagem foi de 20 cm (5 cm de revestimento e 15 cm de base), foi adicionado 3,5% de cimento CP III e 10% de mistura de brita 1 e 2 (ambos em massa). O valor mínimo de resistência de 2,5 MPa aos 7 dias de cura ensaiados em laboratório foi atingido somente com a adição de 5% de cimento.

Contudo, sabe-se que o trincamento de camadas cimentadas está muito relacionado ao alto teor de cimento utilizado e por isso se optou pela incorporação de brita, com o propósito de preservar a resistência mínima e reduzir o teor de cimento. A energia de compactação utilizada na dosagem foi correspondente à modificada do ensaio de Proctor. Os resultados de campo mostraram que a RCS e o grau de compactação (GC) foram continuamente superiores aos mínimos estipulados. Também, mostraram que houve uma redução dos valores de deflexões máximas antes (2002) e depois (2004) da restauração. Tais valores de deflexões apresentaram valores médios inferiores ao valor admissível.

Paiva e Oliveira (2010) realizaram pesquisa com o propósito de verificar a influência dos parâmetros obtidos do ensaio de compactação Proctor (grau de compactação e teor ótimo de umidade) em misturas recicladas com cimento Portland CP II–E32 (77% de fresado asfáltico, 20% de agregado e 3% de cimento). Foram realizados ensaios de RCS e RTCD para 7 dias de cura, o GC utilizado foi entre 90 e 100%, a umidade ótima teve variação de  $\pm 1\%$  e foram ensaiadas na energia Proctor modificada.

Os resultados obtidos por Paiva e Oliveira (2010) revelaram que o grau de compactação é diretamente proporcional tanto para a resistência a compressão como a tração, sendo que quanto maior for o GC maior será a resistência. Já com a variação da umidade, os melhores resultados foram observados nas misturas que



continham 1% de umidade acima da ótima. Os autores estabelecem que para a adição de cimento melhorar o comportamento das misturas, deve-se compactar as misturas no valor de 100% do GC a fim de promover o arranjo dos grãos, de modo a reduzir o volume de vazios das misturas.

Trichês e Santos (2011) avaliaram o desempenho do processo de reciclagem de 30km do pavimento da rodovia SC-150 no trecho entre Joaçaba e Capinzal. A espessura média de reciclagem foi de 20 cm (8 cm de revestimento e 12 cm de base), foi adicionado 3% em peso de cimento Portland e 15% de agregado virgem (ambos em massa). No ensaio de compactação, a energia utilizada foi a modificada.

Foram moldados corpos de prova para determinação da resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. Os resultados mostram que a RTF é cerca de 0,15 a 0,24 da RCS e que também se pode analisar a RTF através do ensaio de compressão diametral. Os resultados de campo, apresentaram uma homogeneidade e redução considerável nas deflexões medidas com viga Benkelman após 3 dias de cura. As medidas foram realizadas levando em consideração que o tráfego era liberado entre o terceiro e sétimo dia.

Trichês e Santos (2013) realizaram novo diagnóstico da rodovia SC-150 após a reciclagem com cimento. Foram medidas as deflexões através de FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e as trilhas de roda, além de efetuar a análise das condições superficiais do pavimento. 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.

Nunes *et al.* (2013) avaliaram o teor necessário de cimento Portland para se atingir a resistência mínima de 2,1 MPa aos 7 dias de cura no ensaio de RCS. Para isso utilizaram materiais da região de Passo Fundo (RS), em que as misturas eram formadas por 78% de RAP e 22% de agregado virgem (rocha basáltica). Os teores de cimento Portland CP V-ARI foram de 1%, 2%, 4% e 8% e a energia do ensaio de Proctor foi correspondente a modificada. Os resultados variaram de 0,69 MPa até 5,66 MPa, a partir disso definiram que o teor de cimento a ser empregado deve ser em quantidade superior a 3,5%.

Ely (2014) analisou o comportamento mecânico de misturas formadas por 70% de RAP (superior ao limite citado pela norma DNIT 167/2013-ES), brita graduada simples e teor de cimento Portland CP II-E igual a 4%. Foram adotadas duas energias de compactação, equivalente à intermediária e à modificada do ensaio de Proctor. Para avaliar o comportamento mecânico das misturas, realizaram-se ensaios de RCS, RTCD e MR. Os tempos de cura empregados foram de 3, 7 e 14 dias.

Como principal conclusão o autor relata que a reciclagem de pavimentos com adição de cimento pode ser executada independentemente da porcentagem de RAP na mistura ser superior ao limite de 50% indicado pela norma DNIT 167/2013-ES. Todavia, deve-se ter consciência de que, quanto maior for a porcentagem de fresado, maior será a influência desse material no comportamento mecânico da mistura, podendo assim levar a uma redução de resistência e rigidez da camada reciclada.

D'Avila (2015) verificou a Resistência à tração na flexão (RTF) e deformação à tração na ruptura de misturas constituídas por BGTC e fresado asfáltico com adição de polímero. O autor variou o teor de cimento Portland CP II-E32 (2%, 4% e 6%) e quantidade de material fresado (20%, 50% e 70%) na mistura, a fim de verificar a influência de tais variáveis. Considerou-se tempo de cura de 28 dias e a energia de compactação utilizada foi a modificada. Os resultados de RTF que são importantes para a presente pesquisa variaram entre 0,32 e 1,34 MPa, sendo que o acréscimo de RAP nas misturas não afetou o ganho de resistência à flexão das misturas para qualquer teor de cimento utilizado. Entretanto, esse fato não foi verificado com a variação do teor de cimento, visto que influenciou nos resultados alcançados, uma vez que a adição de cimento aumentou significativamente a RTF.

#### **2.4.2 Pesquisas realizadas no exterior**

Taha *et al.* (2002) realizaram uma pesquisa em misturas de RAP, agregado virgem e cimento Portland Tipo I. As misturas variaram o fresado asfáltico de 0% a 100% e o teor de cimento de 0% a 7%. Para a análise das propriedades mecânicas realizaram o ensaio de RCS aos 2, 7 e 28 dias de cura. A partir dos resultados, observaram que a resistência das misturas aumentou com o acréscimo de agregado virgem, teor de cimento e com o acréscimo do tempo de cura. Outra conclusão

importante foi que há possibilidade de emprego de bases recicladas com 100% de material fresado, desde que essas sejam estabilizadas quimicamente com cimento. Por fim, constataram que a influência da adição de cimento é mais expressiva do que a inclusão de agregado virgem.

Moreira *et al.* (2006) confirmaram em seu estudo que para atender as especificações exigidas ( $RCS \geq 2,5$  MPa e  $RTCD \geq 0,3$  MPa), pelo Macopav (Manual de Concepção de Pavimento da Espanha) em misturas recicladas com cimento Portland CEMII – 32,5N, haveria a necessidade de empregar traços com 70% de fresado, 30% de pó de pedra e 6% de cimento. Os autores evidenciam que o uso de misturas com 100% de fresado apresentam variabilidade no comportamento, que podem ser explicadas pelo volume de vazios notável (menor superfície de contato dos agregados), perda de aderência entre fresado e cimento pela presença de ligante e desenvolvimento de microfissuras (redução da resistência) oriundas da ausência de material fino na composição.

Sachet *et al.* (2011) estudaram a possibilidade da substituição de 50% dos agregados naturais da composição de um concreto compactado com rolo (CCR) por agregados de material fresado. Foram realizados os ensaios de tração na flexão, tração indireta, módulo de elasticidade e curva-R. O consumo de cimento foi fixado em  $100\text{kg/m}^3$  e o tempo de cura foi de 7 e 35 dias para os ensaios de resistência e módulo e maior que 120 dias para a realização da curva-R. Nesses, foi verificado queda nas resistências, módulos e tenacidade do CCR com fresado em comparação ao CCR de referência, assim como ambos apresentaram curva-R crescentes. Contudo, os autores relataram que por mais que fique evidente os efeitos do fresado no CCR o material alternativo pode substituir o agregado natural no que se refere a sua utilização como agregado para composição de camadas de base ou sub-bases de pavimentos.

Isola *et al.* (2013) analisaram através de ensaios de RCS e RTCD o teor de cimento ideal para obter os parâmetros exigidos pela norma italiana ( $2,5 \text{ MPa} \leq RCS \leq 4,5 \text{ MPa}$  e  $RTCD > 0,25 \text{ MPa}$  aos 7 dias de cura). As misturas compreendem a utilização de materiais reciclados de pavimento, e são descritas a seguir: mistura 1 com 70% de agregado fino e 30% de agregado graúdo, mistura 2 com 50% agregado fino, 20% de agregado graúdo e 30% de fresado e mistura 3 com 10% de agregado fino, 20% de agregado graúdo e 70% de fresado. Através dos resultados,

relataram que para uma RCS de 3,0 MPa aos 7 dias de cura, o teor ideal de cimento aumenta com a adição de RAP nas misturas, sendo: 2,90% para mistura 1, 3,56% para mistura 2 e 3,97% para mistura 3.

Yang e Wu (2014) verificaram em sua pesquisa quais das misturas estudadas estariam de acordo com os limites estabelecidos pela PCA (2,1 a 2,8 MPa). Para avaliar as propriedades mecânicas realizaram o ensaio de RCS aos 7 dias de cura em materiais oriundos da fresagem da camada de revestimento e base de uma rodovia, esses materiais sofreram a adição de agregados virgens a fim de corrigir a granulometria e foram estabilizados quimicamente com cimento da marca BoHai "god lion". As misturas apresentaram uma composição que continha cinco diferentes porcentagens de fresado e cimento variando, respectivamente, entre 0% e 100% e 0,5% a 2,5%. Os resultados atingidos variaram entre 0,36 MPa (100% de fresado e 0,5% de cimento) e 5,15 MPa (100% de base granular e 2,5% de cimento).

Ji *et al.* (2015) fizeram observações quanto as propriedades resultantes da adição de cimento, pó de pedra ou fresado em misturas. Relataram que tanto o acréscimo de cimento como agregado virgem provocam ganho no comportamento mecânico. Por outro lado, a adição de material fresado reduz a resistência e rigidez das misturas. Em relação ao tempo de cura, expuseram que com o passar dos dias o comportamento mecânico também se eleva, entretanto ocorre uma desaceleração na elevação desses parâmetros após 28 dias de cura na avaliação de RCS e após os 60 dias no caso dos ensaios de RTCD e MR. Finalmente verificaram que a RTCD obtida é aproximadamente 0,10 da RCS das mesmas composições.

## 2.5 RELAÇÕES ENTRE TEOR DE VAZIOS E CIMENTO

Larnach (1960) realizou os primeiros estudos sobre as possíveis relações existentes entre a porosidade e o nível de cimentação de misturas. Segundo o autor, a parcela de vazios (incluindo a porção de água e ar incorporados) presentes nos traços de solo-cimento deve ser estudada, visto que é um parâmetro fundamental para sua dosagem. Esta relevância não é evidenciada, por exemplo, em misturas de concreto tradicionais.

Atualmente, muitos pesquisadores vêm desenvolvendo metodologias para a dosagem de misturas cimentadas, tais metodologias levam em conta o tipo de

material empregado, quantidade de agente cimentante e a porosidade resultante dessas misturas. Pesquisas elaboradas por Foppa (2005), Consoli *et al.* (2007, 2008, 2009a, 2009b, 2011), Dalla Rosa (2009), Pasche (2016), entre outros estudos comprovam nitidamente a existência de uma relação unívoca entre o teor de agente cimentante e a porosidade presente em misturas de diferentes tipos de solos ou agregados.

Consoli *et al.* (2007) identificaram que a resistência à compressão não confinada de um solo residual de arenito aumentou quando adicionaram pequenos teores de cimento Portland. Contudo, ao reduzirem a porosidade das misturas, aumentando assim a interação do agente cimentante com a matriz do solo, as amostras apresentaram um desempenho melhor. Dessa forma, os autores desenvolveram uma relação para prever a resistência não confinada, através das relações entre porosidade e teor de agente cimentante.

Em outro trabalho, Consoli *et al.* (2009a) variaram as relações de porosidade e teor de cimentação em uma areia artificialmente cimentada. Os autores verificaram que mesmo variando os níveis de confinamento, os valores de resistência de ruptura eram muito próximos quando as amostras apresentavam similaridade nas relações porosidade/teor volumétrico de cimento. Através dessa constatação, afirmaram que a porosidade, assim como o teor de cimento em conjunto, comanda a resistência de pico em solos artificialmente cimentado.

Pasche (2016) estudou a relação  $\eta/C_{\%}$  em misturas com teor de 70% fresado asfáltico e 30% pó de pedra. Houve a estabilização química das misturas com cimento Portland CPV-ARI nos teores de 3%, 5% e 7%. Para análise do comportamento físico e mecânico das misturas, o autor trabalhou com três energias de compactação (normal, intermediária e modificada) obtendo  $\gamma_d = 2,0; 2,1$  e  $2,2 \text{ g/cm}^3$ , realizando os ensaios de RCS, RTCD, MR e módulo dinâmico aos 28 dias de cura. Com a análise dos resultados, ficou claro que o aumento de resistência varia diferentemente de acordo com a variável adotada, ou seja, as duas resistências e módulos estudados aumentam linearmente com o aumento do teor de cimento e exponencialmente com a redução da porosidade. Além disso, as misturas apresentaram características viscoelásticas oriundas do material fresado. Por fim, o autor relata que a relação porosidade/teor volumétrico de cimento ajustado por um

coeficiente  $[\eta/C_{\%}^{0,41}]$  mostrou-se adequada na previsão das resistências e módulos para todas as misturas estudadas.

Foppa (2005) identificou um fator importantíssimo em relação a umidade das misturas na determinação da RCS em misturas cimentadas. O autor afirma que a relação  $\eta/C_{\%}$  só pode ser avaliada em diferentes traços quando ambas as misturas são preparadas com o mesmo teor de umidade. Visto que a compactação sob diferentes teores de umidade, mesmo mantendo-se constante a massa específica aparente seca, gera diferentes arranjos estruturais entre as partículas.

A porosidade ( $\eta$ ) é definida como a razão de vazios (em volume) sobre o volume total da amostra ( $V$ ). Conforme mostrado na Equação 2 (CONSOLI *et al.*, 2011), também utilizada nos estudos de Pasche (2016), a porosidade é função do peso específico aparente seco, do cimento Portland de resistência inicial ( $C$ ), do conteúdo de RAP e do teor de pó de pedra ( $PP$ ). Cada material ( $RAP$ ,  $PP$  e cimento) tem uma massa específica unitária ( $\gamma_{SRAP}$ ,  $\gamma_{SPP}$  e  $\gamma_{SC}$ ), que também deve ser considerado para o cálculo da porosidade.

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \left( \frac{\left[ \frac{\gamma_d V}{1 + \frac{C}{100}} \right] \left[ \frac{RAP}{100} \right]}{\gamma_{SRAP}} \right) + \left( \frac{\left[ \frac{\gamma_d V}{1 + \frac{C}{100}} \right] \left[ \frac{PP}{100} \right]}{\gamma_{SPP}} \right) + \left( \frac{\left[ \frac{\gamma_d V}{1 + \frac{C}{100}} \right] \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{SC}} \right) \right\}}{V} \quad (2)$$

Ao término desse capítulo, percebe-se a importância que esta pesquisa terá para futuras avaliações de metodologias de utilização de materiais reciclados estabilizados com cimento. A análise realizada através de normativas e de pesquisas nacionais e internacionais, sobre o comportamento e propriedades mecânicas dos materiais pétreos e materiais reciclados estabilizados, foi de suma importância para a avaliação e comparação dos resultados encontrados neste estudo. Assim como, conhecer diferentes métodos de dosagem ajudou principalmente a aperfeiçoar a forma adotada pelo autor para execução dos ensaios. Por fim, utilizar a metodologia de cálculo de porosidade de misturas através da equação adaptada de Consoli *et al.* (2011) foi de grande valia para avaliação das relações que esta pesquisa propôs desenvolver.

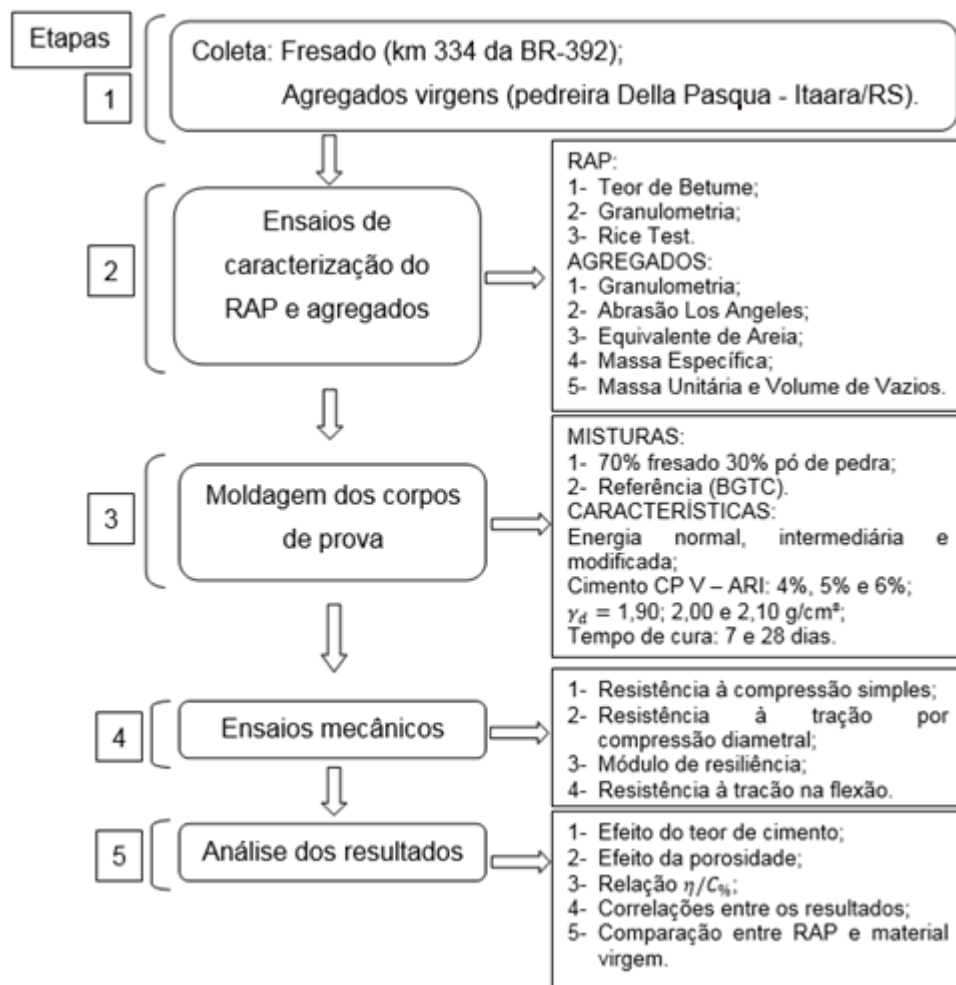
### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo abordará como foi o planejamento no decorrer do estudo, os materiais utilizados, bem como os ensaios laboratoriais executados. São detalhados números de amostras utilizadas e quais normas foram seguidas para cada ensaio.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Para se atingir os objetivos propostos nesta pesquisa, o trabalho foi dividido em cinco etapas, apresentadas no fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor.

O planejamento desta pesquisa se deu pela preparação das misturas compostas pela matriz pétreo reciclada com 70% fresado e 30% pó de pedra e a matriz pétreo de Referência (61,5% pó de pedra, 22,5% brita 3/8" e 16% brita 3/4"), avaliando a influência dos teores de cimento e variações da massa específica aparente seca nas propriedades mecânicas das misturas. As variáveis desta pesquisa podem ser classificadas em três grupos: variáveis independentes, variáveis fixas e variáveis de resposta.

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 umidade: massa de água dividida pela massa da mistura, expresso em porcentagem.

As variáveis fixas são:

- a) tipo de agregados: brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra de formação vulcânica da formação Serra Geral e material fresado asfáltico;
- b) tipos de agente cimentante: cimento CP V-ARI, nos teores de 4%, 5% e 6%;
- c) tempo de cura: 7 e 28 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  $\eta/C\%$ .

A Tabela 7 apresenta o detalhamento dos ensaios utilizados na pesquisa, em que foram moldados um total de 324 corpos de prova tendo as quantidades divididas para cada ensaio descritas em seus respectivos itens. Apresenta também a nomenclatura adotada para as misturas, que leva em consideração o material utilizado (FP ou REF), teor de cimento (4, 5 ou 6%) e massa específica aparente seca (1,90; 2,00 ou 2,10 g/cm<sup>3</sup>).



Tabela 7 – Detalhamento e nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa

Mistura	Ensaio	Cimento (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Nomenclatura	CPs	Cura (dias)	Total
70% fresado 30% pó de pedra (FP)	RCS, RTF e RTCD- MR	4	1,90	<i>FP4</i> <sub>1,90</sub>	3	7 e 28	54
			2,00	<i>FP4</i> <sub>2,00</sub>	3	7 e 28	
			2,10	<i>FP4</i> <sub>2,10</sub>	3	7 e 28	
		5	1,90	<i>FP5</i> <sub>1,90</sub>	3	7 e 28	54
			2,00	<i>FP5</i> <sub>2,00</sub>	3	7 e 28	
			2,10	<i>FP5</i> <sub>2,10</sub>	3	7 e 28	
		6	1,90	<i>FP6</i> <sub>1,90</sub>	3	7 e 28	54
			2,00	<i>FP6</i> <sub>2,00</sub>	3	7 e 28	
			2,10	<i>FP6</i> <sub>2,10</sub>	3	7 e 28	
Referência (REF)	RCS, RTF e RTCD- MR	4	1,90	<i>REF4</i> <sub>1,90</sub>	3	7 e 28	54
			2,00	<i>REF4</i> <sub>2,00</sub>	3	7 e 28	
			2,10	<i>REF4</i> <sub>2,10</sub>	3	7 e 28	
		5	1,90	<i>REF5</i> <sub>1,90</sub>	3	7 e 28	54
			2,00	<i>REF5</i> <sub>2,00</sub>	3	7 e 28	
			2,10	<i>REF5</i> <sub>2,10</sub>	3	7 e 28	
		6	1,90	<i>REF6</i> <sub>1,90</sub>	3	7 e 28	54
			2,00	<i>REF6</i> <sub>2,00</sub>	3	7 e 28	
			2,10	<i>REF6</i> <sub>2,10</sub>	3	7 e 28	

Fonte: Autor.

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

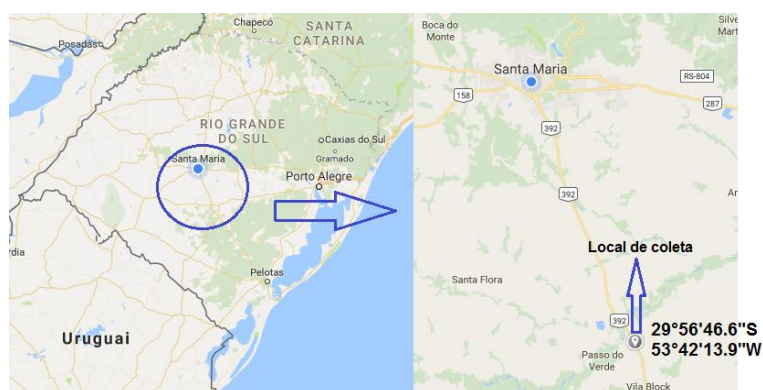
Os materiais utilizados na pesquisa são aqueles convencionalmente utilizados em obras e empreendimentos rodoviários. Esses materiais foram coletados na região de atuação do projeto.

#### 3.2.1 Material fresado asfáltico

O RAP utilizado na elaboração da pesquisa foi coletado na BR-392, durante o processo de recapeamento do pavimento asfáltico em novembro de 2016, no trecho próximo ao km 334 (Figura 4) entre Santa Maria e São Sepé. Foram realizadas coletas diretamente da esteira da máquina fresadora, colocadas em sacos plásticos e depositadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM.

Para a fresagem da pista, utilizou-se uma máquina modelo Wirtgen W 100f, com largura de corte 1m equipada com um rolo composto por 96 bits (Figura 5). O processo de fresagem aconteceu a frio e a altura do corte foi de 5cm.

Figura 4 – Localização do trecho do km 334 na BR-392



Fonte: Adaptado de Google Maps.

Figura 5 – Vista do trecho e máquina fresadora Wirtgen W 100f



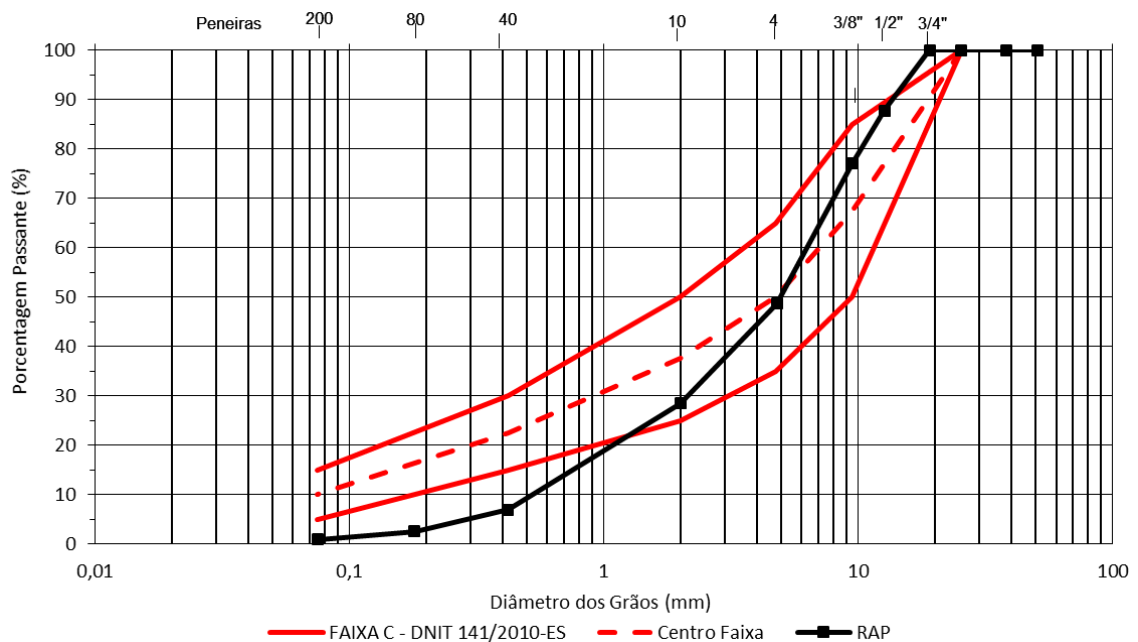
Fonte: Autor.

O fresado asfáltico obtido tem origem de um concreto asfáltico Faixa C da especificação DNIT 031/2006-ES e por um ligante asfáltico CAP 50-70, além do mais, o agregado que constitui a mistura fresada é proveniente do município de Itaara-RS, um Riodacito com alta absorção. Tais informações foram fornecidas pela empresa responsável pela execução dos serviços no trecho.

Para caracterização do RAP foi realizado ensaio de granulometria, antes da extração do betume, normatizado pela norma do DNER-ME 083/1998. Foi realizado o peneiramento em três amostras. A Figura 6 apresenta a curva granulométrica média obtida no ensaio.

Analisando-se a composição granulométrica do material fresado, percebe-se que a parte inferior da curva se encontra fora dos limites da faixa objetivada na pesquisa. Essa falta de finos determina a estabilização granulométrica através da incorporação de pó de pedra na mistura, visando o enquadramento na Faixa C do DNIT 141/2010-ES.

Figura 6 – Curva granulométrica do RAP



Fonte: Autor.

A análise do teor de betume do material extraído em pista foi realizada através do ensaio no Rotarex elétrico por centrifugação, conforme norma DNER-ME 053/1994. A Tabela 8 apresenta os teores de ligantes extraídos de três amostras do RAP utilizado nos ensaios. O valor médio encontrado de teor de betume foi de 5,04%.

Tabela 8 – Teor de betume

Amostra	Teor de betume (%)	Média (%)
Amostra 1	4,94	5,04
Amostra 2	5,30	
Amostra 3	4,89	

Fonte: Autor.

Por fim, o último parâmetro verificado para caracterização do RAP foi sua densidade, o resultado é obtido através do ensaio do Rice, normatizado pela NBR 15619 (ABNT, 2008). A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio, para o cálculo do DMM é utilizada a Equação 3:

$$DMM = \frac{B}{(B+A-C)} \times 0,99707 \quad (3)$$

Onde:

*DMM* = densidade máxima medida (g/cm<sup>3</sup>);

*A* = massa do recipiente (Kitasato) com volume completo com água (g);

*B* = massa da amostra seca ao ar (g);

*C* = massa do recipiente (Kitasato) contendo a amostra submersa em água (g);

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

Tabela 9 – Densidade máxima medida

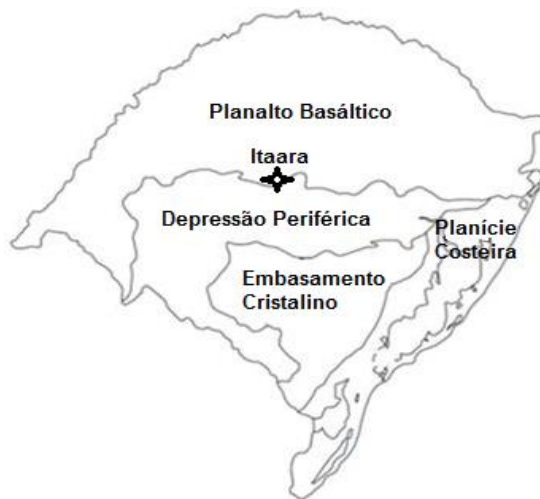
Amostra	A (g)	B (g)	C (g)	DMM (g/cm <sup>3</sup> )	DMM Médio (g/cm <sup>3</sup> )
1	7682,2	1214,4	8421,0	2,546	2,547
2	7682,2	1198,6	8411,9	2,549	

Fonte: Autor.

### 3.2.2 Agregados

Na pesquisa, os agregados virgens empregados nas misturas foram adquiridos por meio de processo de britagem e coletados diretamente das unidades de produção, os quais foram fornecidos pela empresa Della Pasqua Engenharia e Construção LTDA, localizada no município de Itaara/RS. O Rio Grande do Sul é constituído por 4 formações geológicas, apresentadas na Figura 7. O município de Itaara/RS se situa na formação geológica do Planalto Basáltico e os agregados na região se classificam como um Riodacito de origem vulcânica.

Figura 7 – Formações geológicas do Estado do RS



Fonte: Autor.

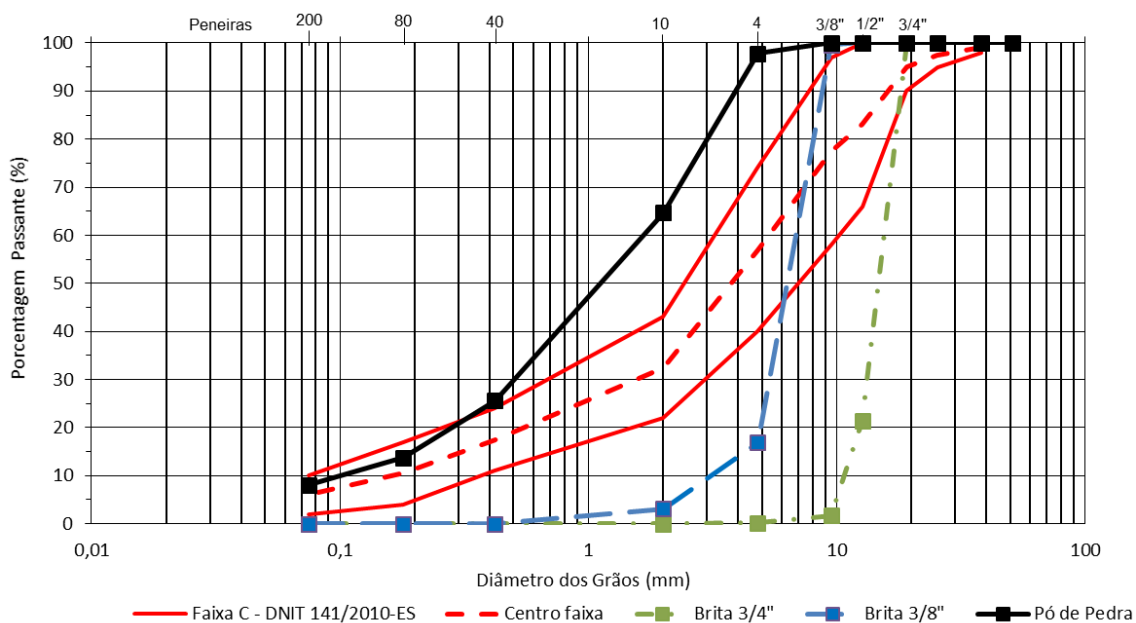
Para composição da mistura com RAP foi utilizado o agregado pó de pedra; já para a composição da mistura Referência foram utilizadas as frações de agregados 3/4", 3/8" e pó de pedra, conforme segue a granulometria realizada de acordo com a DNER-ME 083/1998, apresentada nas Tabela 10 e Figura 8. Além do mais, algumas propriedades desses materiais pétreos foram verificadas em laboratório, as quais estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 10 – 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	21,38	100,0	100,00
3/8"	9,50	1,68	99,7	100,00
nº 4	4,80	0,19	16,9	97,79
nº 10	2,00	0,00	3,2	64,69
nº 40	0,42	0,00	0,0	25,58
nº 80	0,18	0,00	0,0	13,76
nº 200	0,08	0,00	0,0	8,11

Fonte: Autor.

Figura 8 – Curva granulométrica do material pétreo



Fonte: Autor.

Tabela 11 – Propriedades dos agregados utilizados nas misturas

Propriedade	Método	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 54/1997	-		80,04
Volume de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	48,16	46,56	42,89
Massa unitária (Kg/m <sup>3</sup> )		1388,88	1417,75	1523,07
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 195/1997	-	-	2,667
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,48	2,45	-
Absorção (%)		2,93	3,06	-
Abrasão Los Angeles (%)	DNER-ME 35/1998	13%		-

Fonte: Autor.

### 3.2.3 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP V–ARI - cimento de alta resistência inicial produzido pela Votorantim. Esse cimento possui composição mineralógica de clínquer + gesso variando de 95% e 100% e calcário entre 0% e 5%. Sua massa específica é de  $\gamma_d = 3,12 \text{ g/cm}^3$  (VOTORANTIM, 2018). A utilização do cimento Portland neste estudo teve a finalidade de realizar a estabilização química das misturas, utilizando diferentes teores para verificar a influência do parâmetro porosidade/teor volumétrico de cimento e também devido a um histórico de pesquisas já realizadas que envolvem tal parâmetro.

### 3.2.4 Água

A água utilizada na pesquisa é oriunda da rede hidráulica do LMCC da UFSM e é considerada potável. Salvo determinados ensaios em que se fez necessário a utilização de água destilada.

### 3.3 PROCEDIMENTOS

#### 3.3.1 Dosagem e mistura

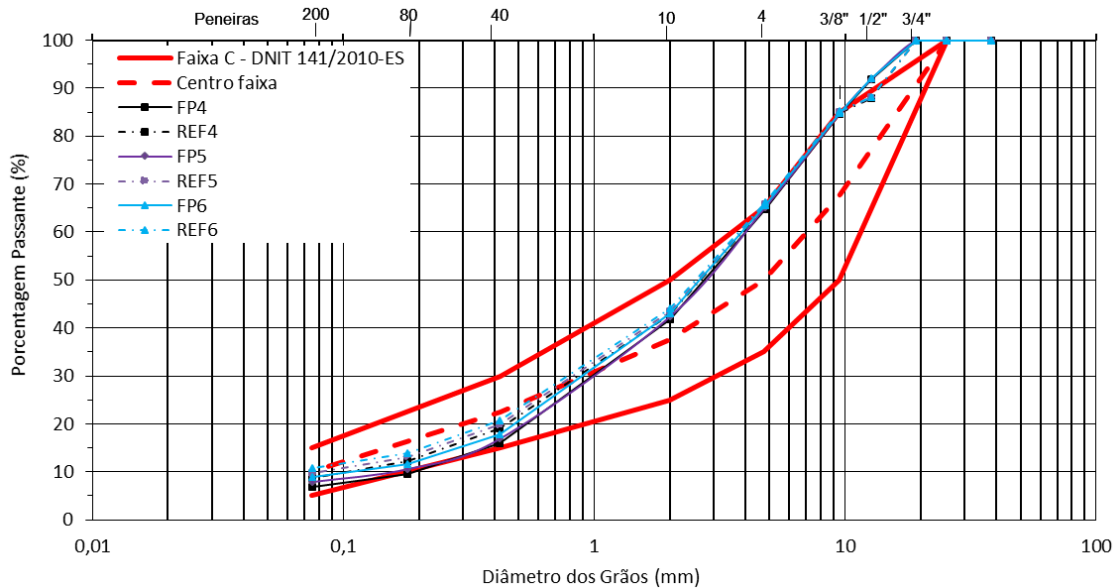
Após o estudo realizado, na etapa de revisão bibliográfica, sabe-se que o RAP apresenta uma deficiência de finos na sua composição granulométrica, isso dificulta seu enquadramento em faixas de estabilização granulométrica utilizadas para camadas de base granular (assim como se observou na Figura 6). Logo, o fresado asfáltico foi estabilizado com pó de pedra para seu devido enquadramento na Faixa C – DNIT 141/2010-ES, que é também uma das faixas sugeridas pela DNIT 167/2013–ES. Foi utilizada a relação de massa de 70% fresado para 30% de pó de pedra, essas já foram estudadas por outros autores (MOREIRA, 2006; PASCHE, 2016; SILVA, 2016) como sendo a mistura mais adequada para enquadramento nas faixas granulométricas, por apresentarem resultados mecânicos satisfatórios e por possibilitarem uma maior utilização do RAP que impacta diretamente na preservação ambiental. Vale ressaltar que foi utilizado apenas material fresado passante na peneira 3/4" (19,1 mm), visto que as dimensões dos corpos de prova permitem agregados com diâmetro máximo de 20 mm.

A mistura Referência (REF) adotada nesta pesquisa foi dosada de forma que houvesse a substituição do material fresado por material virgem. Foi utilizado um traço de 16% brita 3/4", 22,5% brita 3/8" e 61,5% pó de pedra. Para que não ocorra influência da granulometria nos resultados, buscou-se enquadrar ao máximo a mistura Referência para que obtivesse a mesma granulometria da mistura com material fresado.

A Figura 9 apresenta a curva granulométrica das seis misturas utilizadas na pesquisa. Percebe-se pequenas variações granulométricas na parte fina, correspondentes as diferentes porcentagens de cimento incorporadas. Essas variações foram consideradas irrelevantes, visto que todas as misturas se encontram dentro da faixa de trabalho.



Figura 9 – Curva granulométrica das misturas



Fonte: Autor.

### 3.3.2 Compactação Proctor

A normatização do ensaio é especificada na norma DNIT – 164/2013-ME, e foram utilizadas todas as energias de compactação (normal, intermediária e modificada). Devido a necessidade de se obter uma variação de densidade para o cálculo do fator porosidade/teor volumétrico de cimento, utilizou-se a massa específica aparente máxima de cada energia.

Seguindo-se as recomendações de Austroads (2002), realizou-se o ensaio de compactação na mistura FP, composta por 70% fresado e 30% pó de pedra, dado a necessidade de se fixar os resultados do ensaio para todas as misturas estudadas. Além disso, as adições de cimento incorporadas não alteram de maneira significativa o peso específico e a umidade ótima das misturas (previamente verificado através de ensaio). A Figura 10 apresenta a mistura FP pronta para o início do ensaio para energia modificada.

Figura 10 – Início do ensaio de compactação Proctor



Fonte: Autor.

Após a compactação pesa-se o cilindro (Figura 11A) determinando a massa específica úmida do material, obtendo assim a massa específica aparente seca pela Equação 4. Para a determinação da umidade ótima foram retiradas duas amostras do corpo de prova e levadas para estufa por 24 horas (Figura 11B). A Figura 12 apresenta as curvas de compactação encontradas no ensaio de compactação Proctor para cada energia estudada.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w} \quad (4)$$

Onde:

$\gamma_d$  = massa específica aparente seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\gamma_h$  = massa específica aparente úmida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

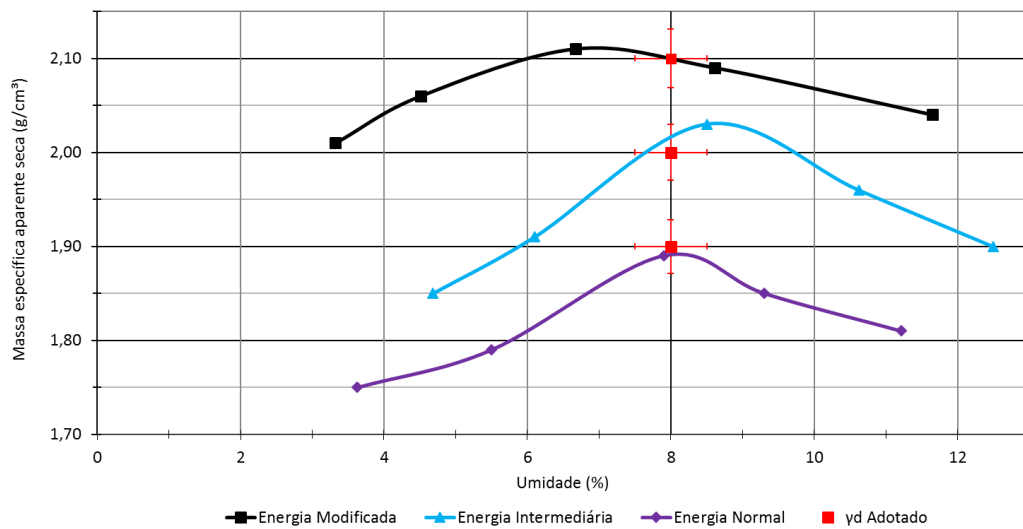
$w$  = umidade do material.

Figura 11 – (A) Pesagem; (B) secagem das amostras



Fonte: Autor.

Figura 12 – Curvas de compactação Proctor



Fonte: Autor.

Como já supracitado a umidade de mistura de amostras cimentadas é um fator importantíssimo na determinação da resistência e rigidez da mesma e a relação  $\eta/C_0$  só pode ser avaliada quando todas as misturas são preparadas em um mesmo teor de umidade. Desta maneira foi escolhida a umidade de 8%, que é a média das umidades ótimas de todas as energias, com isso, obteve-se os  $\gamma_d$  de 1,90 g/cm<sup>3</sup>, 2,00 g/cm<sup>3</sup> e 2,10 g/cm<sup>3</sup> utilizados na pesquisa. Os limites de moldagem

para aceitação dos corpos de prova, apresentadas na Figura 12, serão explicadas no item 3.3.3.

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

Definidos os parâmetros de caracterização das misturas necessários, realizou-se a moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos para realização dos ensaios de resistência e rigidez. Apesar de destinada para corpos de prova em concreto, esta etapa se baseou em alguns pontos no procedimento estabelecido pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

Previamente à moldagem, foi determinada a umidade higroscópica do material fresado e dos materiais pétreos, devido à umidade natural presente nesses materiais. Após, era calculada a quantidade de água necessária a acrescentar nas misturas para que se atingisse com precisão a umidade de 8% (também eram retiradas 2 capsulas por corpo de prova para posterior controle da umidade), definida após o ensaio de compactação.

A mistura dos materiais, como mostrado na Figura 13A foi realizada mecanicamente até se obter uma mistura homogênea. Sendo primeiramente misturado o material granular, na sequência adicionado o teor de cimento e pôr fim a adição de água. Imediatamente após a mistura, era realizada a compactação. Sendo que durante o tempo de moldagem a betoneira era coberta com pano umedecido para evitar perda de umidade da mistura (Figura 13B). A cada porção de material retirado da betoneira, a mesma foi religada a fim de misturar o material novamente.

Figura 13 – (A) Mistura dos materiais em betoneira; (B) Proteção contra perda de umidade



Fonte: Autor.

Os moldes (Figura 14) utilizados na pesquisa receberam uma fina camada de óleo mineral para auxiliar na desforma. Os mesmos têm as seguintes dimensões:

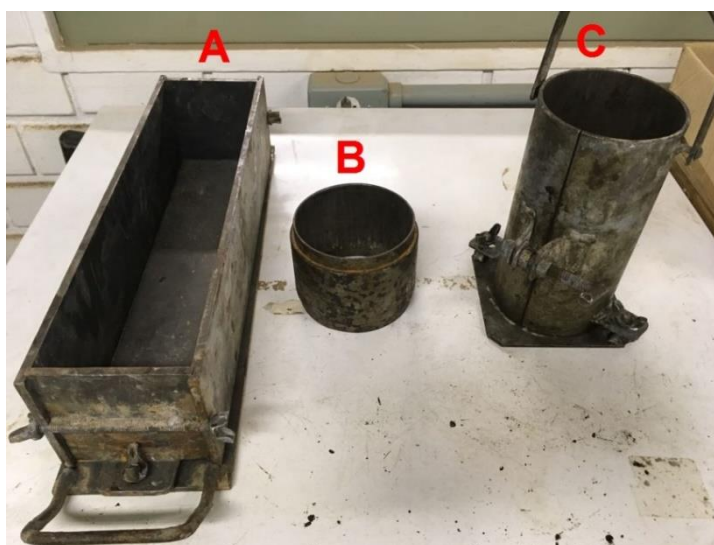
- a) resistência à tração na flexão: 100 x 100 x 400 mm;
- b) resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência: 100 x 63 mm;
- c) resistência à compressão simples: 100 x 200 mm;

Desconsiderando os lotes que foram excluídos por não se enquadrarem nos parâmetros de controle (umidade de moldagem e grau de compactação), foram moldados para cada mistura e tempo de cura três corpos de prova, totalizando 108 amostras para cada ensaio. Sendo que as amostras do ensaio de RTCD eram as mesmas utilizadas no ensaio de MR.

As amostras foram compactadas com energia dinâmica, através de 3 camadas para RCS (Figura 15A) e 1 camada para RTCD e MR (Figura 15B), já o ensaio de RTF foi compactado em 1 camada com energia estática através de uma prensa hidráulica com capacidade de aplicação de carga de 100 tf (Figura 15C). A quantidade de material a ser utilizada por camada foi calculada de acordo com a massa específica do traço (1,90; 2,00, ou 2,10 g/cm<sup>3</sup>) e volume do CP. Durante a compactação, as interfaces entre as camadas foram escarificadas, de modo a

promover uma melhor aderência. Após compactada a última camada, duas pequenas porções da mistura eram retiradas e colocadas em cápsula para determinação do teor de umidade. A média dos dois teores de umidade medidos foi adotada como sendo o teor de umidade do corpo de prova.

Figura 14 – Moldes utilizados na pesquisa: (A) ensaio RTF; (B) ensaio RTCD/MR; (C) ensaio RCS



Fonte: Autor.

Figura 15 – (A) Compactação ensaio RCS; (B) compactação ensaio RTCD/MR; (C) compactação ensaio RTF



Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram mantidos dentro dos moldes em câmara úmida durante as primeiras 48 horas com a finalidade de evitar a desagregação no estágio inicial de cura. Após este tempo, eram desmoldados, identificados, medidos três vezes na altura, diâmetro ou largura com aproximação de 0,1 mm, pesados com precisão de 0,1g e levados novamente à câmara úmida durante o período de cura de 7 e 28 dias (Figura 16).

Figura 16 – Corpos de prova em câmara úmida



Fonte: Autor.

Foram considerados aptos para ensaios os corpos de prova que atendiam as tolerâncias apresentadas pelas barras de controle da Figura 12, são elas:

- a) massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ): grau de compactação de 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. (Exemplo: para  $\gamma_d = 1,90 \text{ g/cm}^3$  consideram-se aceitáveis corpos de prova que apresentavam valores compreendidos entre 1,872 e 1,928  $\text{g/cm}^3$ );
- b) teor de umidade:  $8,0 \pm 0,5$  pontos percentuais.

### 3.3.4 Resistência à compressão simples (RCS)

Os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) ou resistência à compressão não confinada apresentam boa efetividade na verificação do

comportamento de misturas estabilizadas com cimento Portland. Por se tratar de um ensaio de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico vem sendo utilizado na maioria dos programas experimentais relatados na literatura. Ainda que não seja um ensaio usualmente utilizado na pavimentação, para esta pesquisa tem grande importância por ser um bom indicador da correlação  $\eta/C\%$ .

Contudo, ainda não existem especificações para sua utilização com material reciclado, por isso, o ensaio seguiu os procedimentos gerais descritos pela norma DNER – ME 180/1994. Também foram adotados nesta pesquisa alguns parâmetros das normas de BGTC: NBR 11803 (ABNT, 2013) - Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento – Requisitos e NBR 12261 (ABNT, 2013) - Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento.

As 108 amostras foram capeadas (Figura 17) com argamassa (traço com 50% argamassa pronta marca Votorantim e 50% cimento Portland CP V-ARI) para melhor distribuição das tensões em sua face de contato com o pistão da prensa. Após 6 e 27 dias na câmara úmida, as amostras eram submersas em tanque com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação. A prensa hidráulica da marca Amsler, número de série 599/644, calibrada na escala de 10kN pela Instruqual foi utilizada para aplicar o esforço de compressão até a ruptura dos corpos de prova.

Figura 17 – Capeamento dos corpos de prova 100 x 200 mm



Fonte: Autor



Observa-se na Figura 18 o corpo de prova pronto para realização do ensaio. A resistência à compressão simples do corpo de prova é calculada dividindo a carga de ruptura pela seção transversal do corpo de prova, conforme apresentado na Equação 5:

$$RCS = \frac{F}{\pi \times r^2} \quad (5)$$

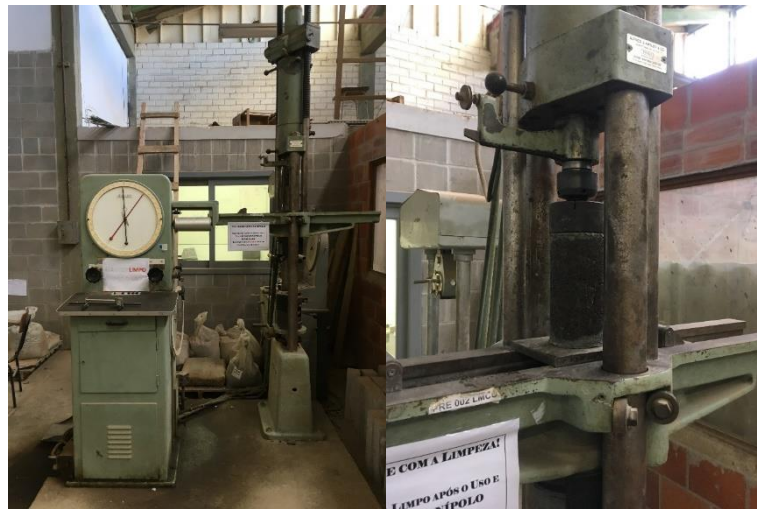
Onde:

$RCS$  = resistência à compressão (MPa);

$F$  = carga de ruptura (N);

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

Figura 18 – Amostra pronta para ensaio de RCS



Fonte: Autor

### 3.3.5 Módulo de resiliência (MR)

O ensaio de MR seguiu as prescrições da norma DNIT 134/2010-ME. O equipamento utilizado para realização deste ensaio é uma prensa hidráulica modelo *Universal Test Machine* - UTM 25 da IPC Global, a qual é composta por um pistão acoplado a um regulador de tempo e frequência (Figura 19), que possibilita a execução do ensaio em diversas temperaturas e frequências de carregamento.

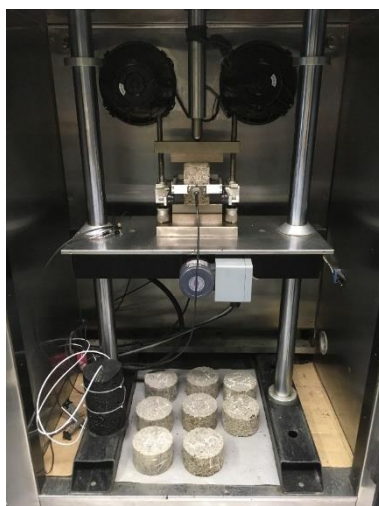
Figura 19 – Prensa UTM 25



Fonte: Autor.

Após cura úmida, os 108 CPs foram condicionados por um período de no mínimo 12 horas, a fim de atingir a temperatura uniforme especificada. Cada amostra foi ensaiada (Figura 20) em duas direções, 0° e 90°, logo, os valores apresentados como resultados são médias entre 2 ensaios da mesma amostra.

Figura 20 – Condicionamento e amostra pronta para ensaio de MR

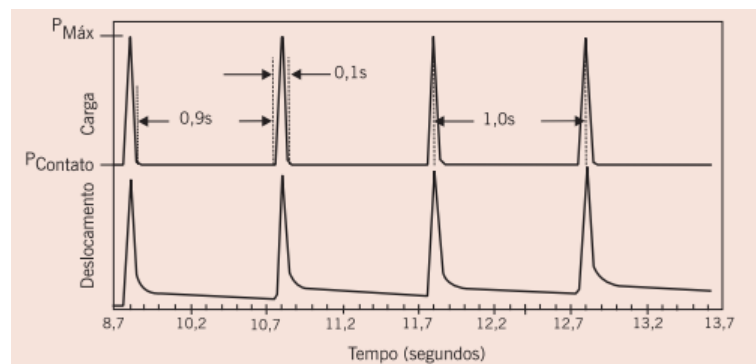


Fonte: Autor.

O MR foi determinado na temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , por meio da aplicação de carga repetida de compressão ao longo do plano diametral, considerando um coeficiente de Poisson de 0,20, conforme: Trichês e Santos (2011), Moreira *et al.* (2006) e Vorobieff e Wilmot (2001). Em decorrência do ensaio de módulo de resiliência ser não destrutivo, devido as baixas cargas aplicadas, os CPs podem ser usados para mais testes de carga sob diferentes condições ambientais (HUANG, 1993). Por essa razão, os corpos de prova foram ensaiados em 3 frequências diferentes (5, 10 e 25hz) simulando diferentes situações de tráfego.

Os LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) medem o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal (nas duas faces do corpo de prova), através da aplicação de carga que gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da mesma. A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto, com o tempo de aplicação de carga de 0,10 segundo e, portanto, 0,90 segundo de repouso ou descarregamento (Figura 21).

Figura 21 – Tempo de carregamento e repouso ensaio MR



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Com os valores mínimos de carga aplicada (para que se obtenha um coeficiente de variação abaixo de 8%) e deslocamentos horizontais recuperáveis obtidos, é calculado o módulo de resiliência, por meio da Equação 6. O valor é apresentado diretamente pelo software.

$$MR = \frac{P}{\Delta \times H} (0,9976 \times \mu + 0,2692) \quad (6)$$

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 = 0,20.

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

O ensaio de RTCD é outro teste comumente indicado na literatura para análise, não só de misturas recicladas com cimento, mas de qualquer material estabilizado quimicamente. Além disso, a tração é a principal solicitação sofrida por camadas cimentadas em pavimentos, tornando sua análise indispensável. De acordo com Ingles e Metcalf (1972), o conhecimento a respeito da RTCD é de grande interesse quando utilizado misturas cimentadas. Os autores 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.

Posteriormente ao pré-condicionamento de 12 horas, a  $25 \pm 0,1$  °C, e realização dos ensaios de MR, os mesmos 108 corpos de prova foram ensaiados quanto à resistência à tração por compressão diametral. O ensaio seguiu as recomendações explícitas da norma DNIT 136/2010-ME, em que eram utilizadas amostras com dimensões de altura entre 3,50 cm e 6,50 cm e diâmetro de  $10 \pm 0,2$  cm.

O procedimento desse ensaio consiste na 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).

Os ensaios foram realizados na mesma prensa utilizada no ensaio de MR. Esta e seu software permitem a medição do deslocamento vertical e da carga em

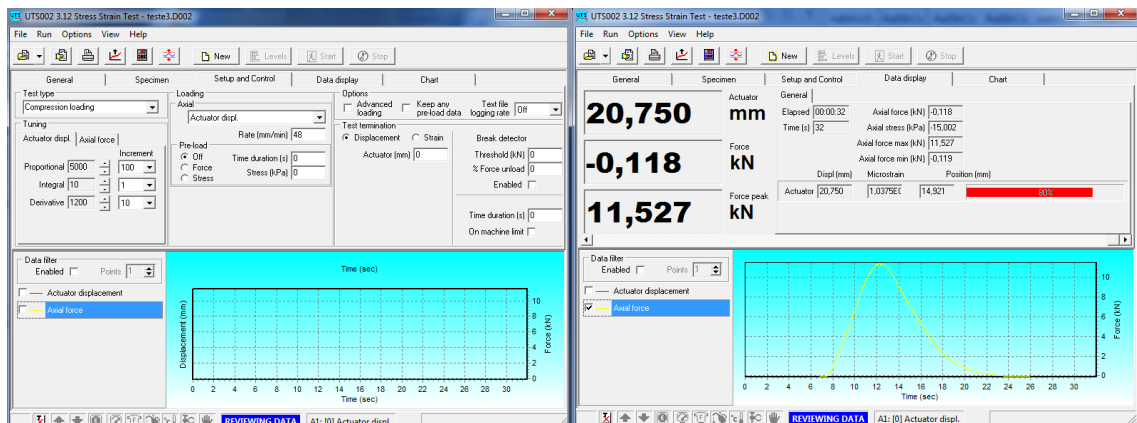
função do tempo. Foram realizados os testes com deformação controlada vertical, aplicando-se uma taxa de deslocamento de 0,8 mm/s. A Figura 22 apresenta a amostra pronta para início do ensaio e o CP após a ruptura. Já a Figura 23 ilustra a tela de entrada de dados e a interface gráfica de saída dos resultados do ensaio de RTCD.

Figura 22 – Amostra pronta para ensaio de RTCD e CP após ruptura



Fonte: Autor.

Figura 23 – Tela de entrada de dados e interface gráfica de saída dos resultados



Fonte: Autor.

Logo, obtém-se a força de ruptura ( $F$ ) do CP necessária ao cálculo dos valores de RTCD (Equação 7). Também através das medidas de deslocamento vertical e força a cada 0,01 segundo, foram calculados os parâmetros de

Tenacidade, Índice de Tenacidade, bem como a Energia de Fratura implementados pelos trabalhos de Faccin (2018).

$$RTCD = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (7)$$

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).

A tenacidade é a capacidade de um material absorver energia e se deformar plasticamente antes da fratura. Segundo Putman e Amirkhanian (2004), o cálculo da tenacidade é realizado de acordo com a área sob a curva Tensão de tração *versus* o deslocamento horizontal até uma deformação do dobro da incorrida com a tensão máxima, esse valor é denominado como a tenacidade do material. Para o cálculo da deformação horizontal se considera a teoria da elasticidade utilizando o coeficiente de Poisson. O Índice de Tenacidade (IT) é um parâmetro adimensional que descreve a tenacidade na região pós-pico, também calculado a partir dos resultados do ensaio de RTCD.

A Energia de Fratura pode ser considerada um indicador de performance de trincamento por fadiga de misturas asfálticas (KIM; WEN, 2002). Os autores indicam que por mais que a resistência à tração e a deformação durante o pico de carregamento não sirvam como indicadores de resistência à fadiga, a correlação entre a energia de fratura e o trincamento por fadiga pode servir. Esse parâmetro é obtido através da área sob a curva até a deformação de tração no momento de ruptura (máxima tensão).

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

De acordo com Salvador (2013), os ensaios de tração em vigas são variações do método japonês (JCI, 1984). Em relação ao concreto, os ensaios têm sido

desenvolvidos para avaliação unicamente da resistência de ruptura, assim como nas misturas cimentadas. A Tabela 12 resume os principais critérios dos ensaios de referência relacionados a esta pesquisa.

Tabela 12 – Comparativo entre as normas de referência

<b>Critério/Norma</b>	<b>JSCE-SF4 (1984)</b>	<b>AUSTROADS (2008)</b>	<b>NBR 12142 (ABNT, 2010)</b>
Material	Concreto reforçado com fibras de aço	Misturas cimentadas	Concreto
Taxa carregamento	mm/min 0-L/600: 0,06 a 0,12 L/600-L/150: 0,06 a 0,24	kPa/min 990	kPa/min 900-1100
Dimensões corpo de prova (mm)	100 x 100 x 350; 150 x 150 x 500	100 x 100 x 400	150 x 150 x 500 100 x 100 x 400
Vão (mm)	300; 450	300	450; 360
Tempo de cura (dias)	Não específica	28	Não específica
Número de LVDTs	2	1	Nenhum
Suporte LVDTs	Yoke	No topo da viga	Nenhum

Fonte: Autor.

Este ensaio seguiu a normativa NBR 12142 (ABNT, 2010), em que foram moldados 108 CPs nas dimensões de 100 x 100 x 400 mm. Pelo fato de ser empregado para determinação de resistências, não foram medidos os deslocamentos. Após o tempo de cura, as amostras foram ensaiadas na prensa hidráulica da marca Amsler (mesma utilizada no ensaio de RCS).

De acordo com Pinto (1991, p. 109), o procedimento de ensaio segue, de maneira teórica, a seguinte forma:

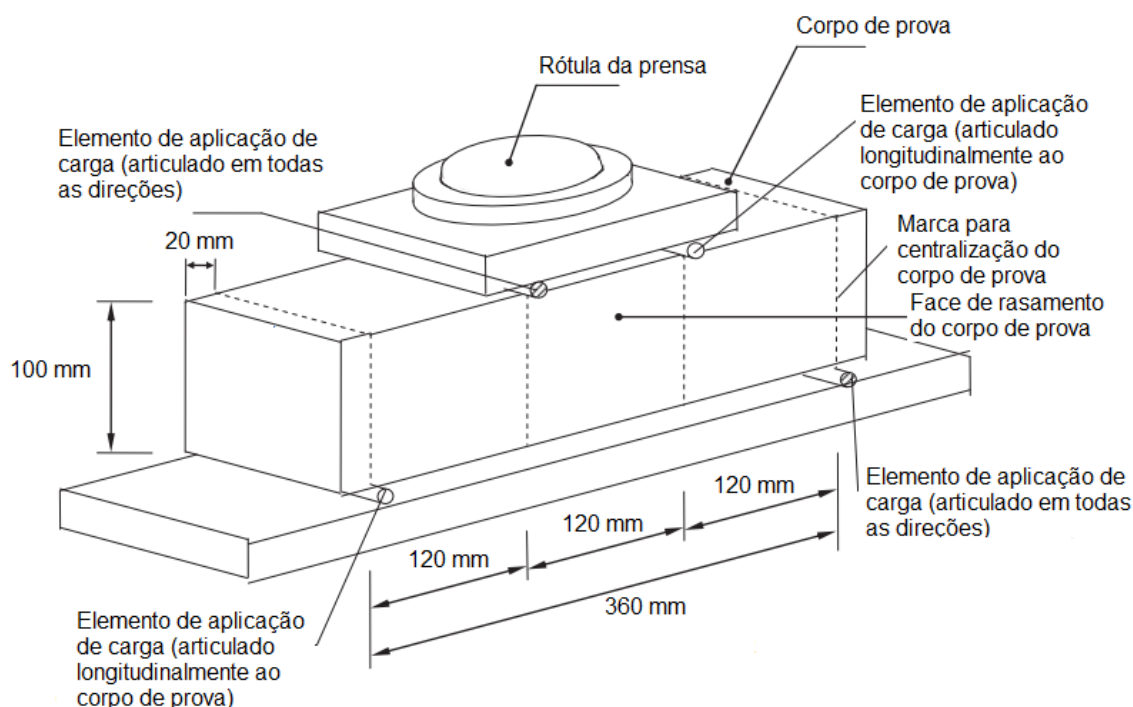
“[...] consiste em submeter uma vigota retangular simplesmente apoiada a duas cargas simétricas em relação ao centro da vigota, que produzem um estado de tração uniforme na parte central do bordo inferior da vigota, abaixo da linha neutra, entre os dois pontos da carga.”

Ao solicitar o CP a esse carregamento, surge uma região (entre os pontos de aplicação de carga) sob ação de um momento fletor máximo e constante, com esforços cortantes nulos. Assim, garante-se um ensaio adequado, pois é possível

induzir a ruptura exclusivamente por flexão (CERATTI, 1991). A Figura 24 mostra o esquema da execução deste ensaio.

Conforme Cervo (2004) a velocidade sugerida pela NBR 12142 (ABNT, 2010) para aplicação de carga em ensaios de CPs de dimensões de 150 x 150 x 500 mm é de 0,13 kN/s. Contudo, deve-se considerar a relação entre volumes dos dois tipos de CPs, por isso é necessário reduzir a velocidade de aplicação da carga na mesma proporção, ocasionando um valor de 0,05 kN/s.

Figura 24 – Configuração para ensaio RTF



Fonte: Adaptado de NBR 12142 (ABNT, 2010).

Aplica-se um carregamento com carga constante até que a ruptura ocorra, esta devendo ocorrer no terço central da viga ou no máximo até 5% além do terço médio (realizar correção no cálculo da tensão de tração). A Figura 25 ilustra a vigota pronta para ser ensaiada e o resultado da fratura no terço central dos corpos de prova. Por fim, a resistência à tração na flexão é dada pela Equação 8:



$$RTF = \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (8)$$

Onde:

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

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

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

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

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

Figura 25 – Vigota pronta para ensaio de RTF e CPs após ruptura



Fonte: Autor.

### 3.3.8 Determinação da porosidade, teor volumétrico de cimento e correlações da $\eta/C_{\%}$ com parâmetros de rigidez e resistência

As determinações da porosidade ( $\eta$ ), teor volumétrico de cimento ( $C_{\%}$ ) e correlações ( $\eta/C_{\%}$ ) dos corpos de prova foram verificados após uma série de levantamentos das propriedades dos CPs. Caputo (1996) relata que para se determinar as propriedades de um material se deve verificar os índices e relações dos mesmos, uma vez que as propriedades dependem dos seus constituintes e das proporções relativas entre eles. A porosidade de um material está relacionada aos volumes e pesos dos seus constituintes, para isso a determinação do teor de

umidade, peso específico aparente seco de cada material e índices de vazios é imprescindível.

Como já apresentado anteriormente, Pasche (2016) utilizou a Equação 2 para determinar a porosidade de suas misturas de fresado, pó de pedra e cimento. Contudo, há uma diferenciação de metodologias adotadas, o teor de cimento utilizado pelo autor foi adicionado em relação a massa total de agregados, enquanto nesta pesquisa o teor de cimento foi empregado em substituição a massa da mistura. Por esse fato, a Equação 9 foi utilizada para determinação da porosidade das misturas com RAP na composição.

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} \right] \left[ \frac{RAP}{100} \right]}{\gamma_{SRAP}} \right) + \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} \right] \left[ \frac{PP}{100} \right]}{\gamma_{SPP}} \right) + \left( \frac{\gamma_d V \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{SC}} \right) \right\}}{V} \quad (9)$$

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>);

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

$C$  = teor de cimento (%);

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

$PP$  = teor de pó de pedra (%).

Para determinação da porosidade nas misturas de Referência, foi utilizada a Equação 10. Na qual *BRITA 3/4"* e *BRITA 3/8"* são os teores em porcentagem de cada material na composição da mistura e  $\gamma_{SBRITA\ 3/4"}$  e  $\gamma_{SBRITA\ 3/8"}$  representa a massa específica aparente seca de cada material.

$$\eta = 100 - \frac{100 \left\{ \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} \right] \left[ \frac{BRITA\ 3/4"}{100} \right]}{\gamma_{SBRITA\ 3/4"}} \right) + \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} \right] \left[ \frac{BRITA\ 3/8"}{100} \right]}{\gamma_{SBRITA\ 3/8"}} \right) + \left( \frac{[\gamma_d V] \left[ 100 - \frac{C}{100} \right] \left[ \frac{PP}{100} \right]}{\gamma_{SPP}} \right) + \left( \frac{\gamma_d V \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{SC}} \right) \right\}}{V} \quad (10)$$

De acordo com Caputo (1996) o teor volumétrico de dado material constituinte de uma mistura, pode ser calculado a partir da relação de seu volume com o volume total da amostra. Portanto, a Equação 11 calculou o teor volumétrico de cimento ( $C_{\%}$ ) de cada corpo de prova.

$$C_{\%} = 100 \frac{V_c}{V} = 100 \frac{\left[ \frac{M_{CP}}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)} \right] \left[ \frac{C}{100} \right]}{\gamma_{s_c} V} \quad (11)$$

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>).

Por fim, a partir da razão do resultado obtido na Equação 9 ou Equação 10 pelo resultado da Equação 11 se determina a relação  $\eta/C_{\%}$ . Essa relação foi utilizada para avaliar parâmetros de rigidez e resistência obtidos nos ensaios estudados.

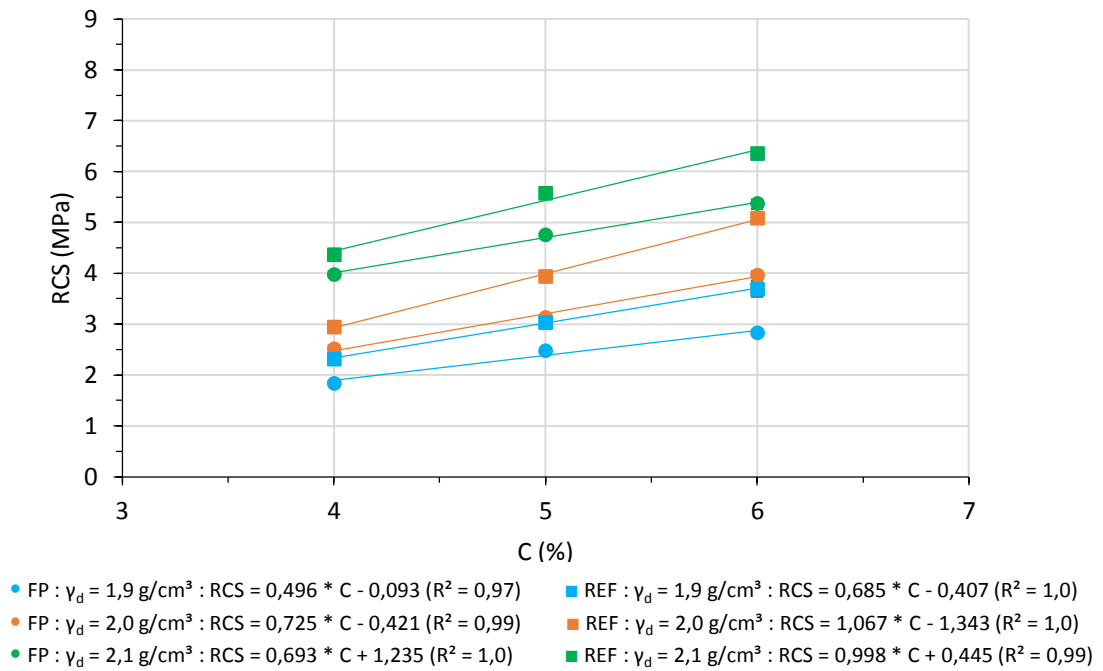
## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste Capítulo, estão apresentados os resultados obtidos após a realização dos ensaios descritos no Capítulo 3 bem como sua discussão no intuito de cumprir os objetivos estabelecidos. Para todos os ensaios realizados nesta dissertação, foram adotados graus de cimentação correspondentes a 4%, 5% e 6% em substituição a massa seca dos agregados. Nestes níveis de cimentação, preparou-se amostras para dois tempos de cura (7 e 28 dias), com três massas específicas aparentes secas, correspondentes aos valores 1,90; 2,0 e 2,1 g/cm<sup>3</sup>. Todas as misturas possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=8\%$ ). Os resultados dos diferentes ensaios serão apresentados em relação ao efeito do teor de cimento, porosidade e  $\eta/C_{0\%}$ . Posteriormente, serão analisadas suas correlações e comparações entre as diferentes matrizes pétreas. Os corpos de prova analisados foram os que atenderam aos critérios de aceitação, descritos no item 3.3.3, tendo como valor médio de grau de compactação, para as diferentes massas específicas, o valor de 100,13% e 8,06% para umidade de todos os corpos de prova aceitos. Nas legendas das figuras que apresentarão os gráficos dos resultados constará o tipo de material utilizado, densidade, tipo de ensaio e equação da mistura. Por apresentarem um melhor ajuste, a maioria das linhas de tendência será do tipo potencial. Os pontos apresentados nas análises dos resultados corresponderão a média de três corpos de prova moldados com características idênticas. Os demais resultados e propriedades dos CPs estão apresentados nos Apêndices A ao F.

### 4.1 EFEITO DO TEOR DE CIMENTO

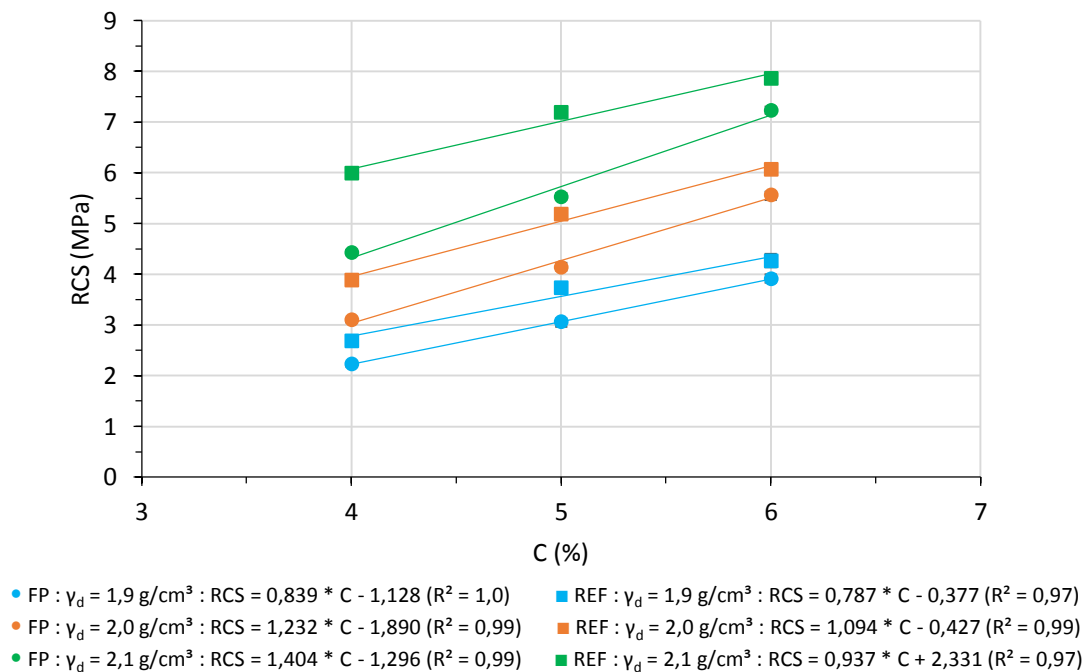
Nas Figuras 26 a 37 são apresentadas as retas da variação de resistências e módulos obtidos em função dos teores de cimento. Cada ponto corresponde à média de resistência de três corpos de prova moldados com características idênticas.

Figura 26 – Variação da RCS em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura



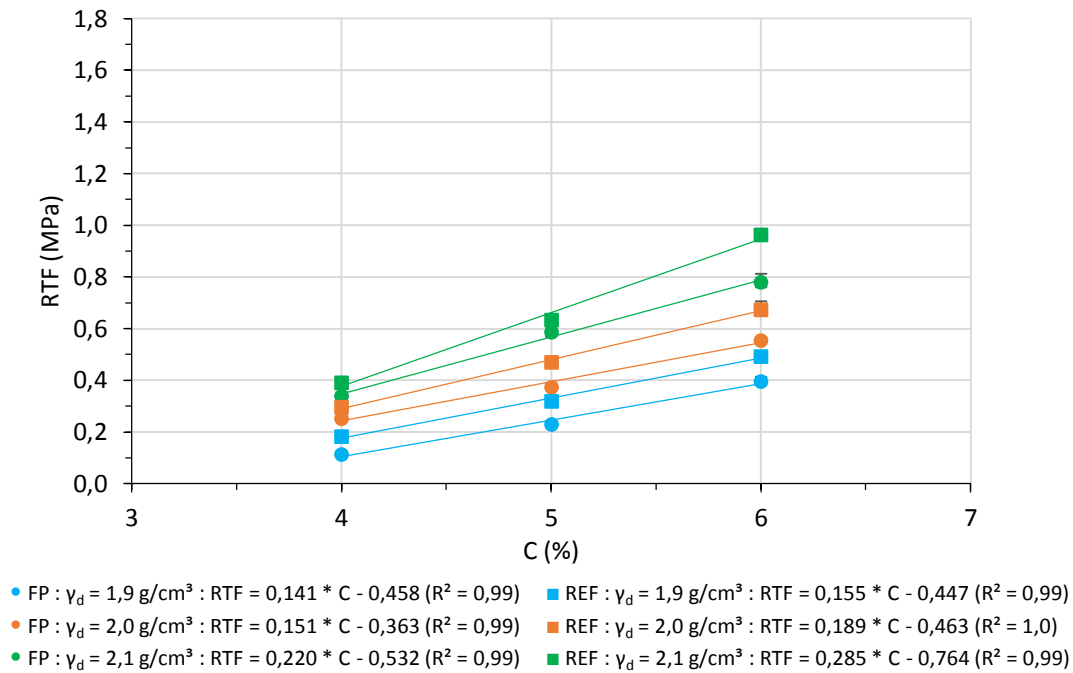
Fonte: Autor.

Figura 27 – Variação da RCS em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura



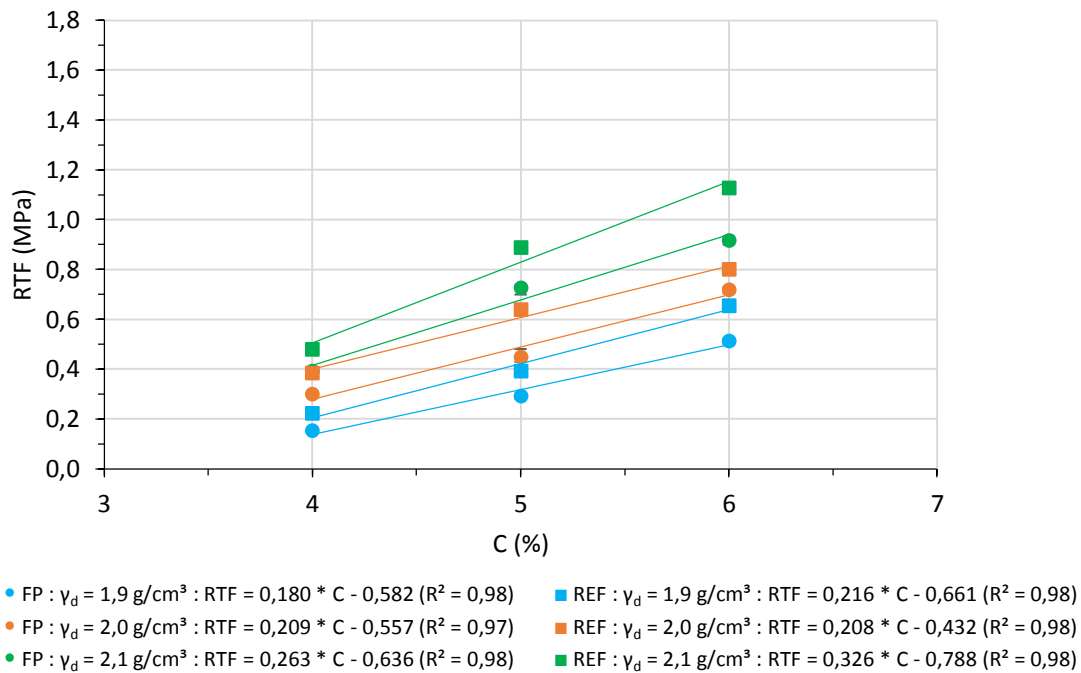
Fonte: Autor.

Figura 28 – Variação da RTF em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura



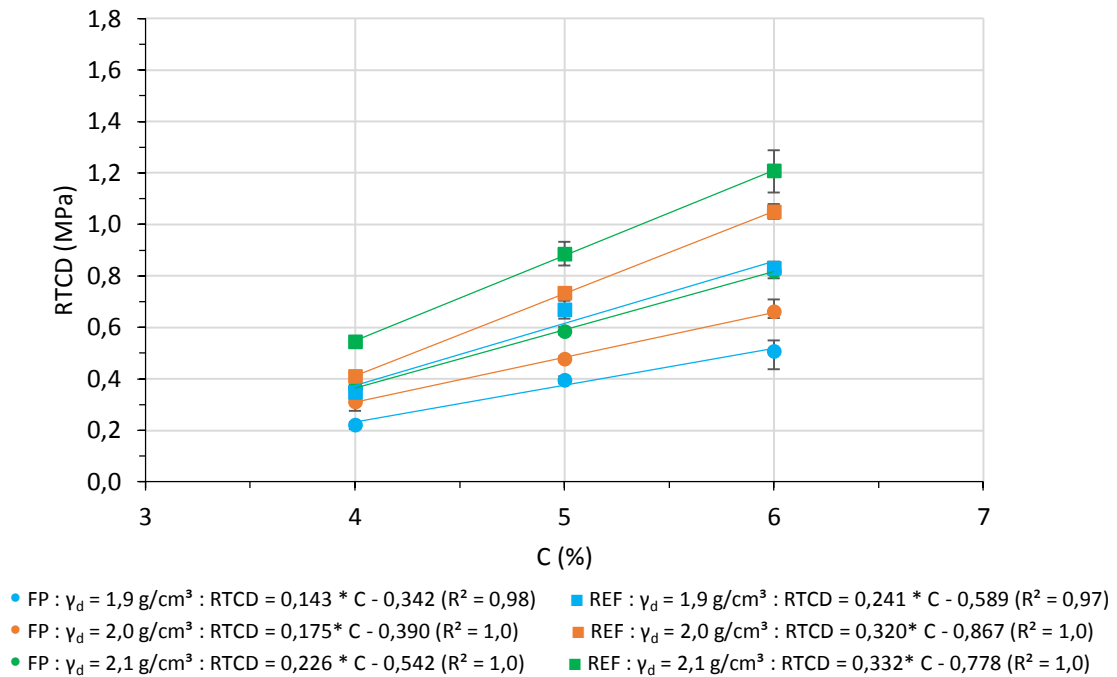
Fonte: Autor.

Figura 29 – Variação da RTF em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura



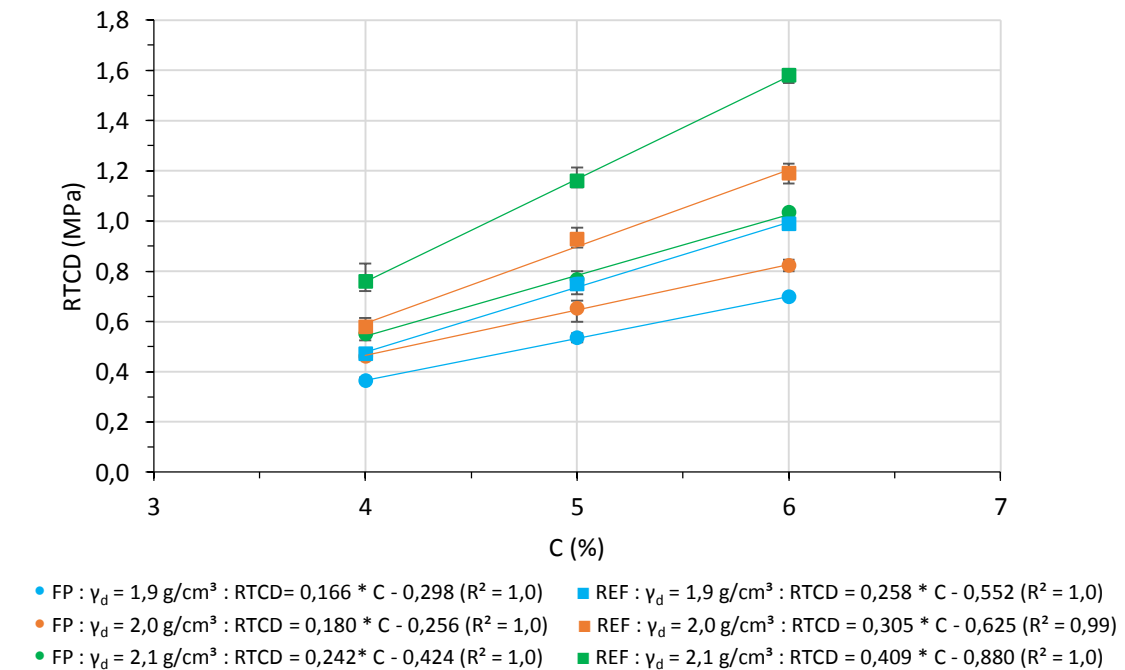
Fonte: Autor.

Figura 30 – Variação da RTCD em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura



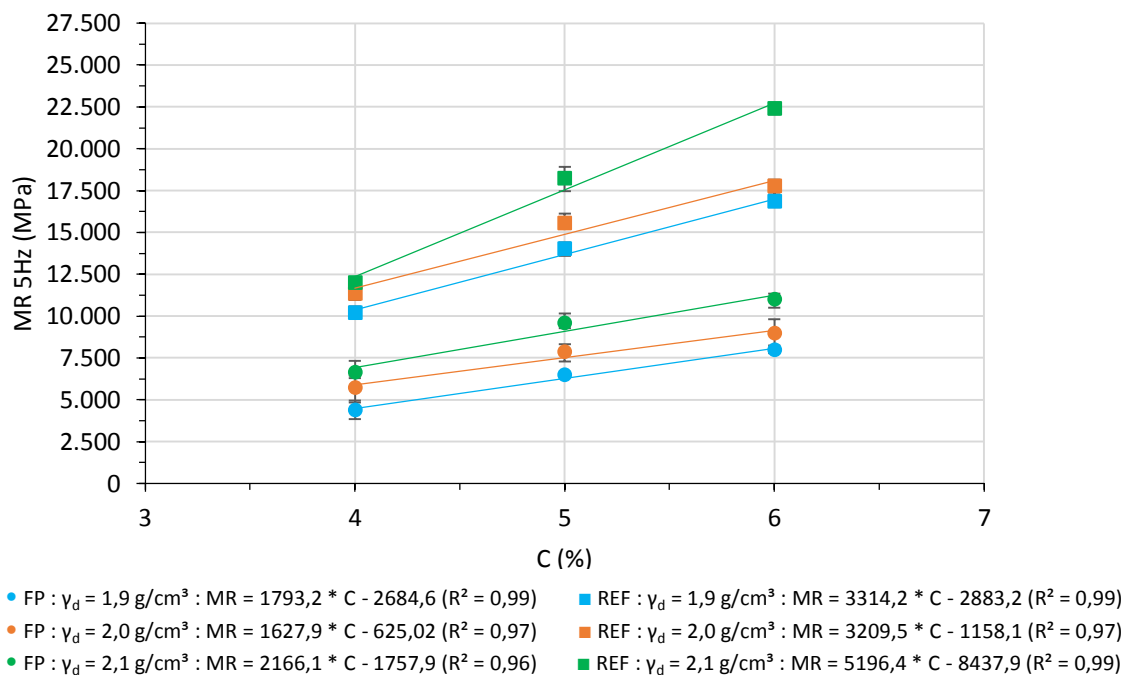
Fonte: Autor.

Figura 31 – Variação da RTCD em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura



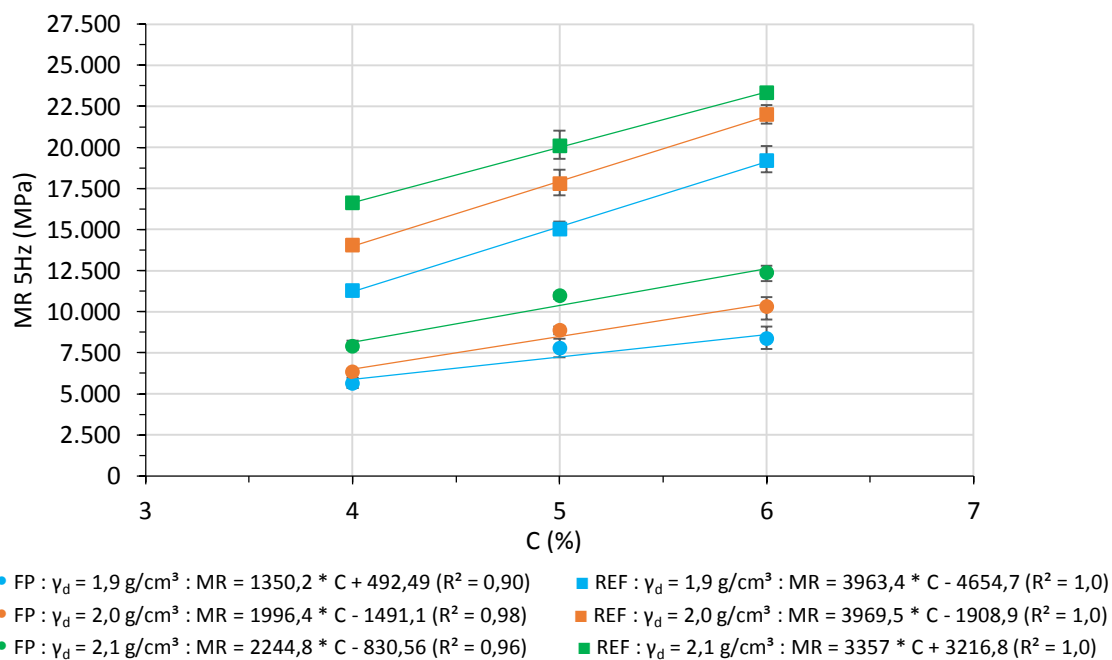
Fonte: Autor.

Figura 32 – Variação do MR 5Hz em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura



Fonte: Autor.

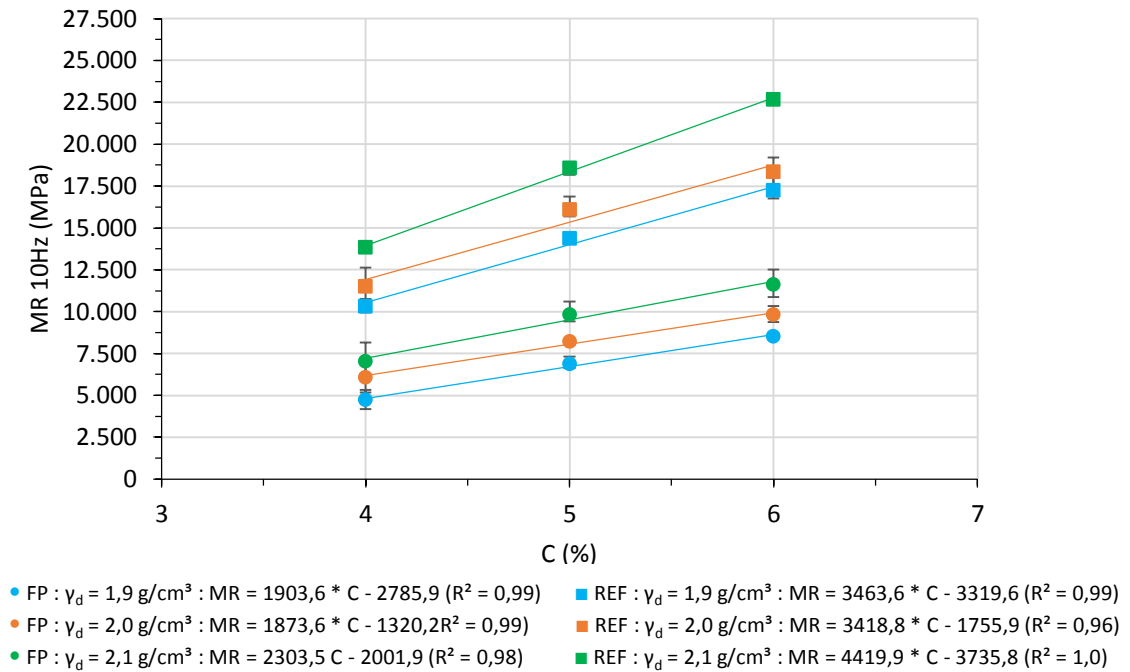
Figura 33 – Variação do MR 5Hz em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura



Fonte: Autor.

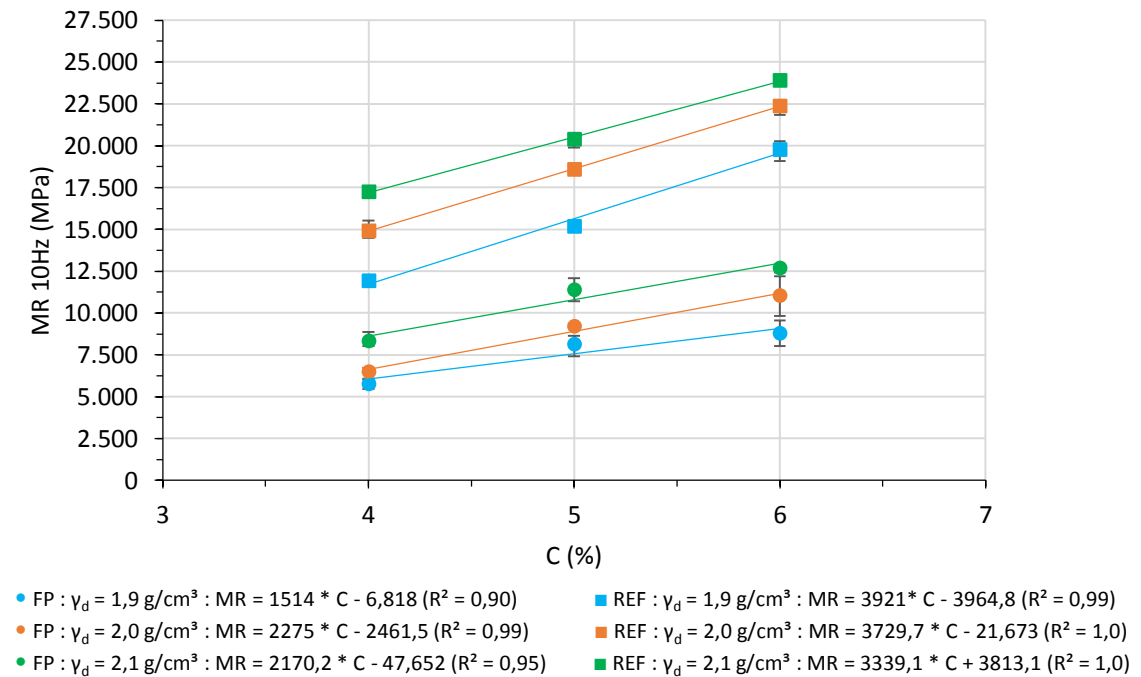


Figura 34 – Variação do MR 10Hz em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura



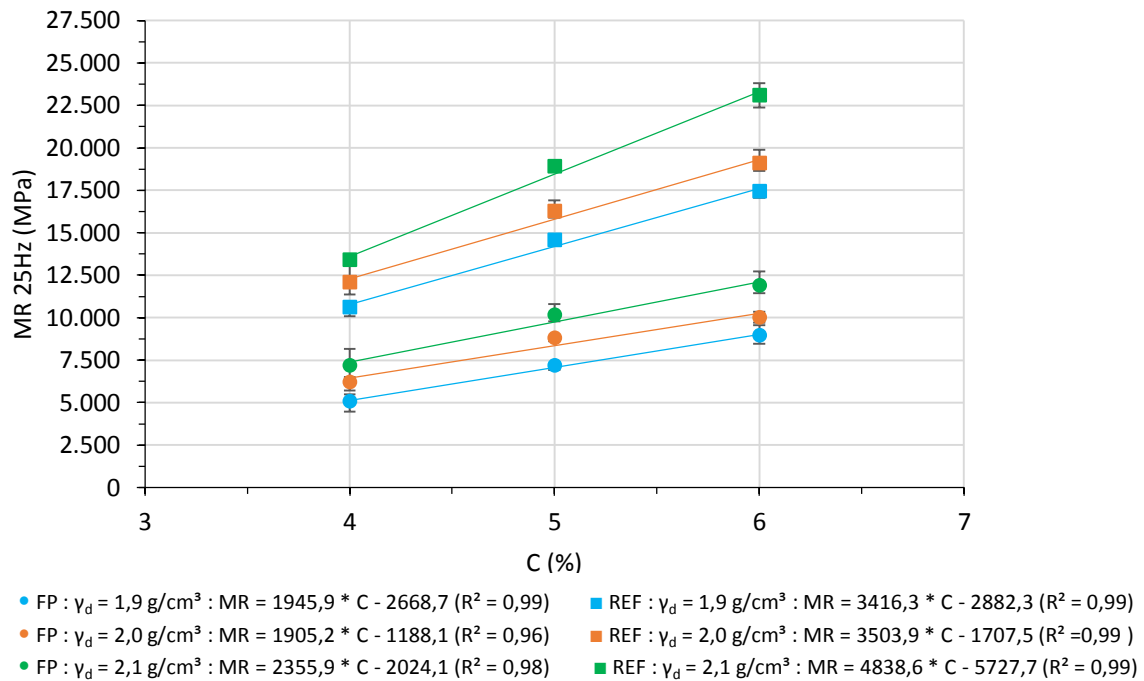
Fonte: Autor.

Figura 35 – Variação do MR 10Hz em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura



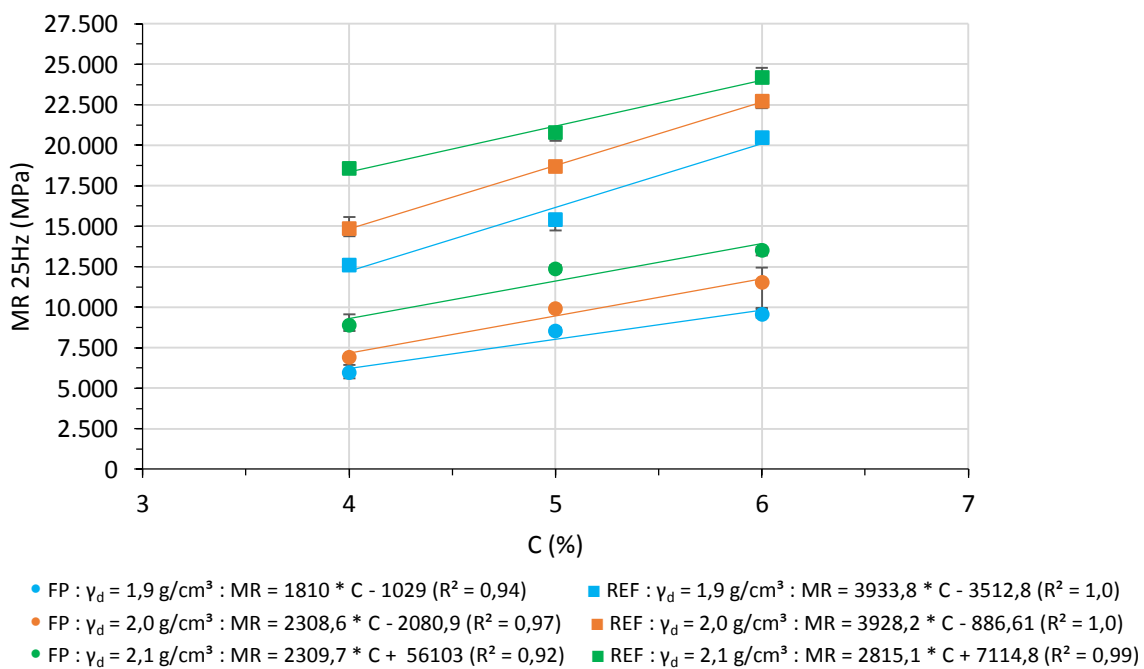
Fonte: Autor.

Figura 36 – Variação do MR 25Hz em relação ao teor de cimento para 7 dias de cura



Fonte: Autor.

Figura 37 – Variação do MR 25Hz em relação ao teor de cimento para 28 dias de cura



Fonte: Autor.

Pela análise das Figuras 26 a 37 se verificou que a adição de cimento, mesmo em pequenas proporções, tem um grande efeito sobre a resistência e rigidez do material. Para cada 1% de acréscimo de cimento ocorreu um aumento médio de 24,5% para o ensaio de RCS, 57,9% para RTF, 47,6% para RTCD e 26% para os ensaios de MR. Apesar de utilizar diferentes teores de cimento, Pasche (2016) constatou essa mesma tendência em seus estudos.

Também se observou que, independentemente do tipo de material utilizado, fresado ou agregado natural, todas as misturas apresentaram um aumento linear em suas resistências e módulos com o aumento da quantidade de cimento. Outro aspecto observado nas Figuras 26 a 37 e também em Foppa (2005), Consoli *et al.* (2008), entre outros, é que a taxa de acréscimo da resistência cresce exponencialmente com a redução de porosidade, ou seja, para um mesmo teor de cimento, aumentando-se a energia de compactação, aumenta-se a resistência e rigidez. Logo, o fato de adicionar cimento não é garantia de bons resultados se o material não for compactado a ponto de promover um arranjo entre os grãos que assegure a redução de vazios da mistura. Isso pode ser verificado em praticamente todos os ensaios, onde CPs moldados com 4% de cimento e 2,10 g/cm<sup>3</sup> de densidade apresentaram resultados mais satisfatórios que misturas moldadas com 6% de cimento e 1,90 g/cm<sup>3</sup> de densidade.

Outro ponto importante verificado foi a diferença apresentada entre os resultados de resistência e rigidez para as misturas com RAP e BGTC. Os resultados vão de encontro aos obtidos nas pesquisas de Sachet *et al.* (2011, 2013) e Huang *et al.* (2005, 2006), nos quais, sabe-se que a pequena quantidade de pasta de cimento presente nas misturas é incapaz de causar o envolvimento completo de grande parte dos grãos do agregado, formando apenas ligações pontuais entre os mesmos. Isso somado a presença de CAP envolvido nos agregados do fresado fragiliza as ligações cimentantes e, conseqüentemente, as misturas com materiais naturais apresentam resultados superiores. As misturas com material fresado apresentaram em média 76,9% das resistências e 50,2% dos módulos obtidos com as misturas de BGTC. Essa considerável diferença para os módulos provavelmente se deve a presença do ligante asfáltico que encobre os agregados do RAP. A consequência observada nos ensaios é que a presença do ligante nas misturas com material fresado ocasionam uma variação de módulo quando se altera a frequência

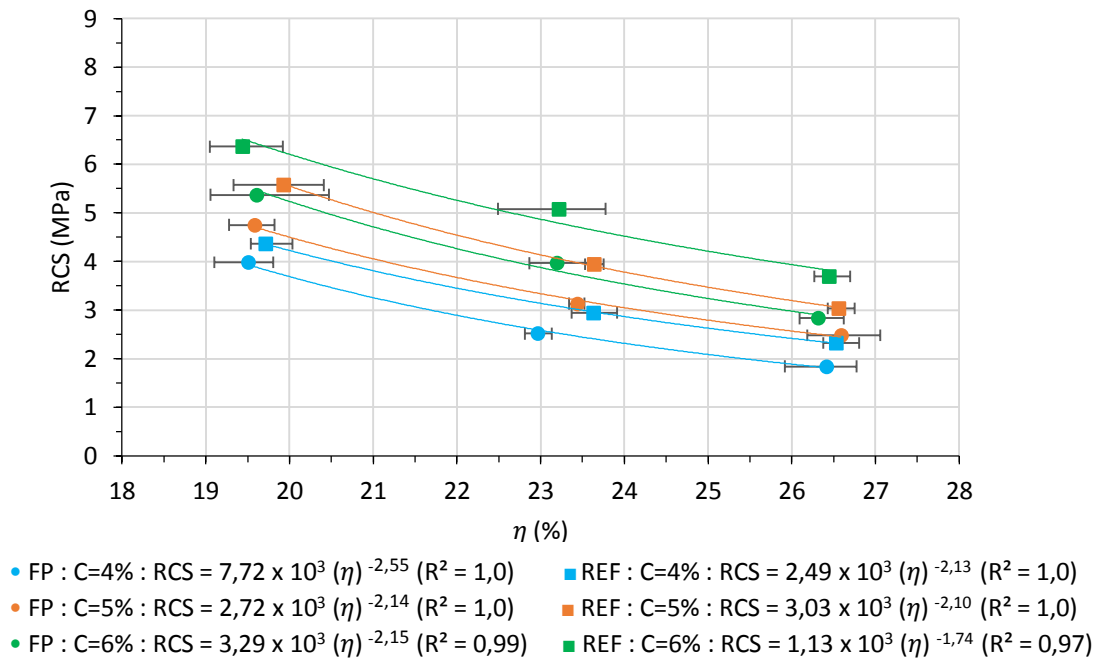
de carregamento. Essa variação, comparando os resultados obtidos com as frequências de 5hz e 25hz, foi de um acréscimo de aproximadamente 12% para as misturas FP e de 4% para as misturas REF. Em outras palavras, as misturas de RAP demonstram apresentar propriedades viscoelásticas, isto é, apresentam deformações elásticas dependentes do tempo de aplicação de carga que acabam por reduzir sua rigidez em comparação a uma BGTC que apresenta comportamento frágil. As propriedades viscoelásticas apresentadas por misturas com RAP também foram relatadas no estudo de Pasche (2016), a fragilidade da BGTC é minuciosamente descrita nos ensaios realizados por Balbo (2006). Tais fatos, somados as conclusões obtidas por Severi *et al.* (1999) referentes aos comportamentos resilientes típicos nos enfatiza que a realização do ensaio de módulo de resiliência em diferentes frequências se justifica para misturas com material fresado, principalmente por apresentarem uma variação significativa de sua rigidez dependentes do tempo de aplicação da carga. Entretanto, para misturas com comportamento frágil, como a BGTC, a rigidez tende a se manter constante com os diferentes tempos de aplicação de carga, não justificando a realização do ensaio em diferentes frequências para essas misturas.

Com relação aos resultados da pesquisa, verificou-se um baixíssimo desvio padrão, representado pelas barras de dispersão. Por fim, as misturas apresentaram aos 7 dias de cura uma resistência e rigidez de aproximadamente 80% do valor obtido aos 28 dias de cura. Esse valor está de acordo com a indicação da Associação Brasileira de Cimento Portland, visto que, aponta-se que a resistência à compressão aos 7 dias de cura de misturas que utilizem cimento Portland CP V-ARI é de aproximadamente 83% da resistência aos 28 dias de cura.

#### 4.2 EFEITO DA POROSIDADE

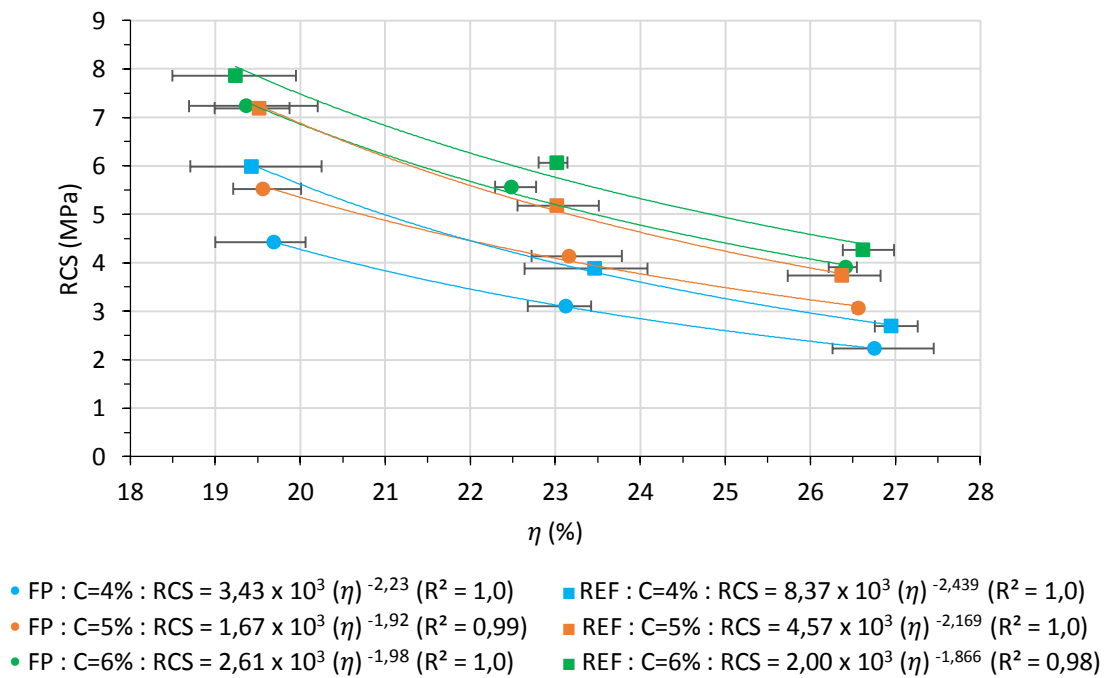
Nas Figuras 38 a 49 são apresentados os resultados da variação de resistências e módulos obtidos em função da porosidade. Cada ponto corresponde à média de resistência de três corpos de prova moldados com características idênticas.

Figura 38 – Variação da RCS em relação à porosidade para 7 dias de cura



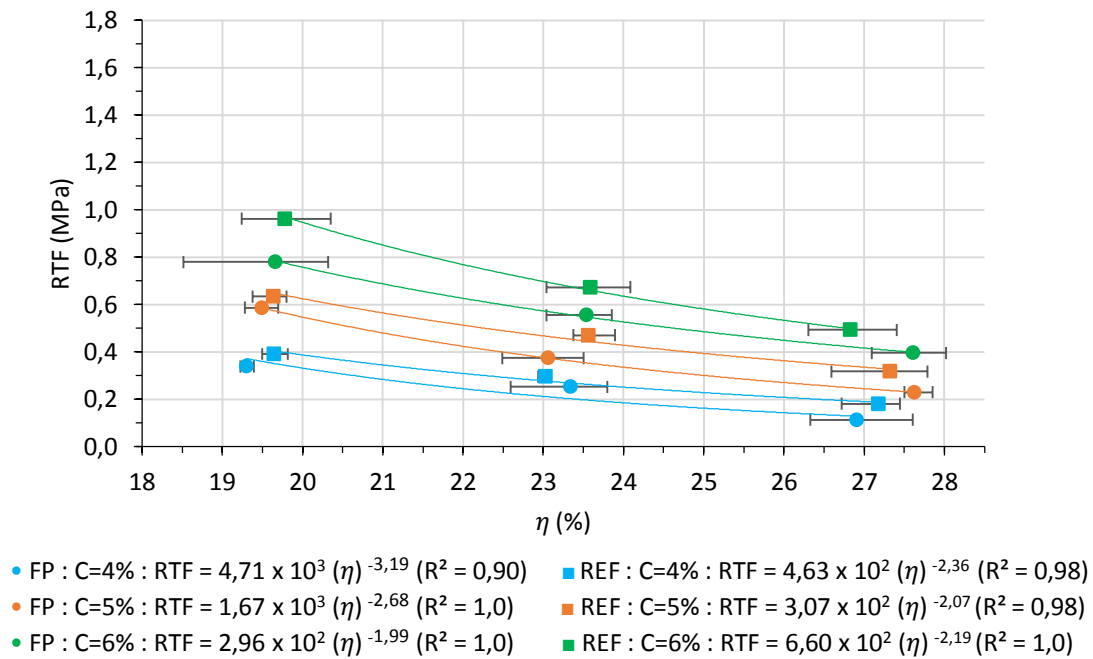
Fonte: Autor.

Figura 39 – Variação da RCS em relação à porosidade para 28 dias de cura



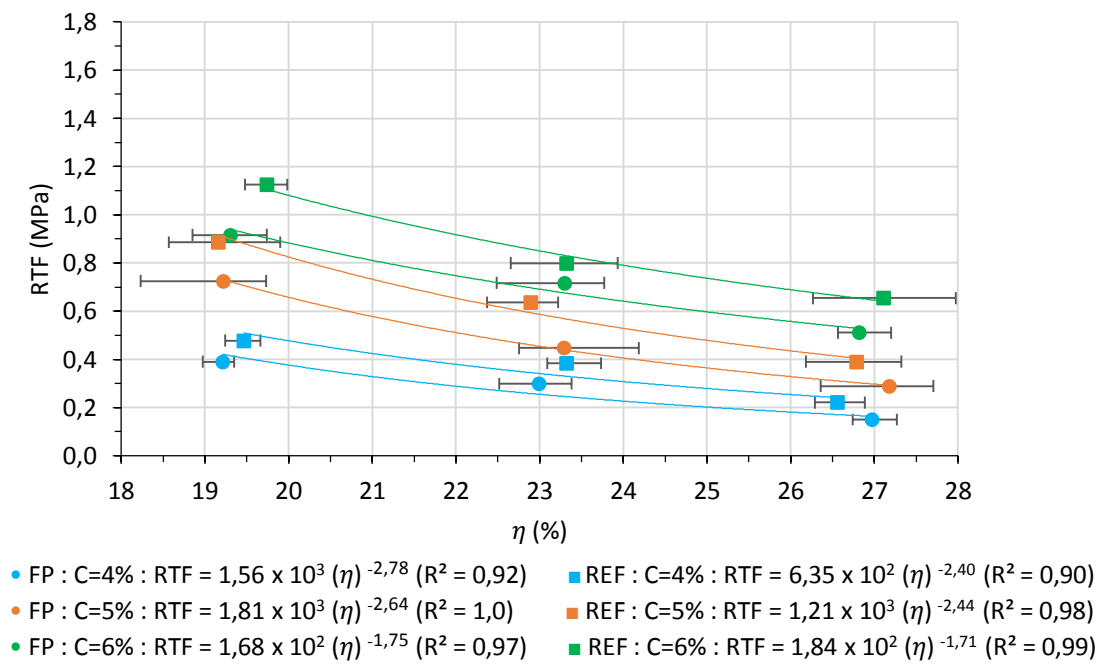
Fonte: Autor.

Figura 40 – Variação da RTF em relação à porosidade para 7 dias de cura



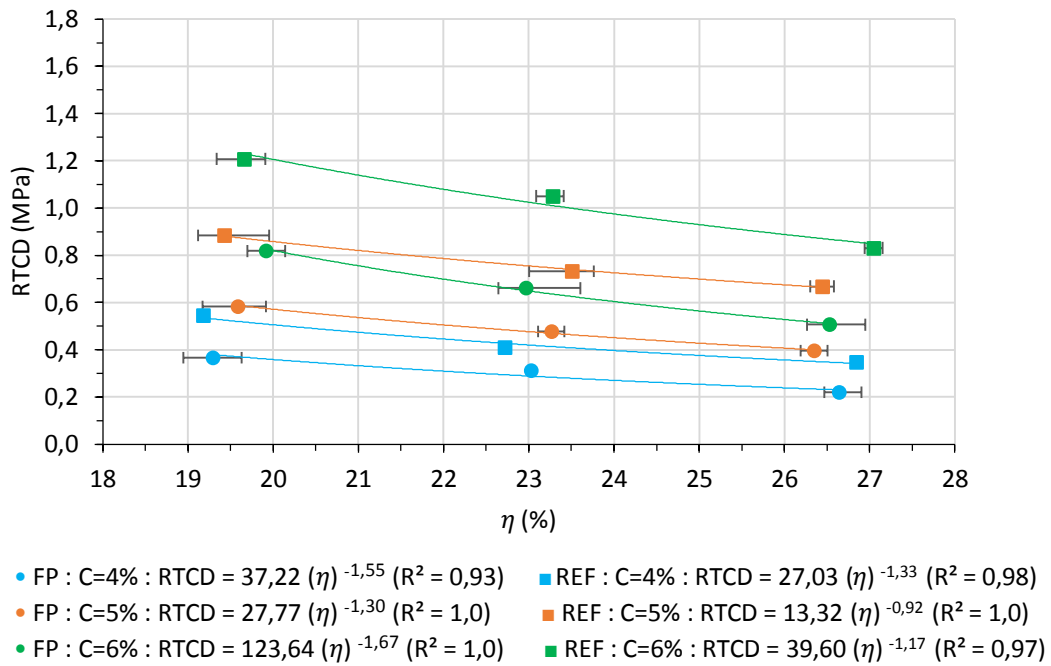
Fonte: Autor.

Figura 41 – Variação da RTF em relação à porosidade para 28 dias de cura



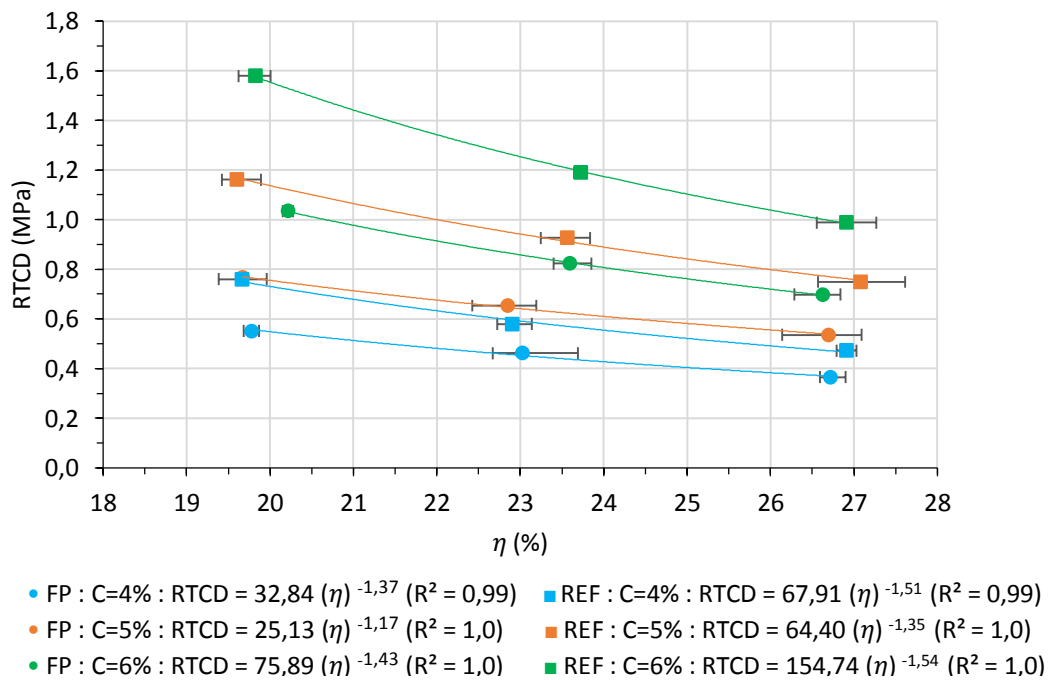
Fonte: Autor.

Figura 42 – Variação da RTCD em relação à porosidade para 7 dias de cura



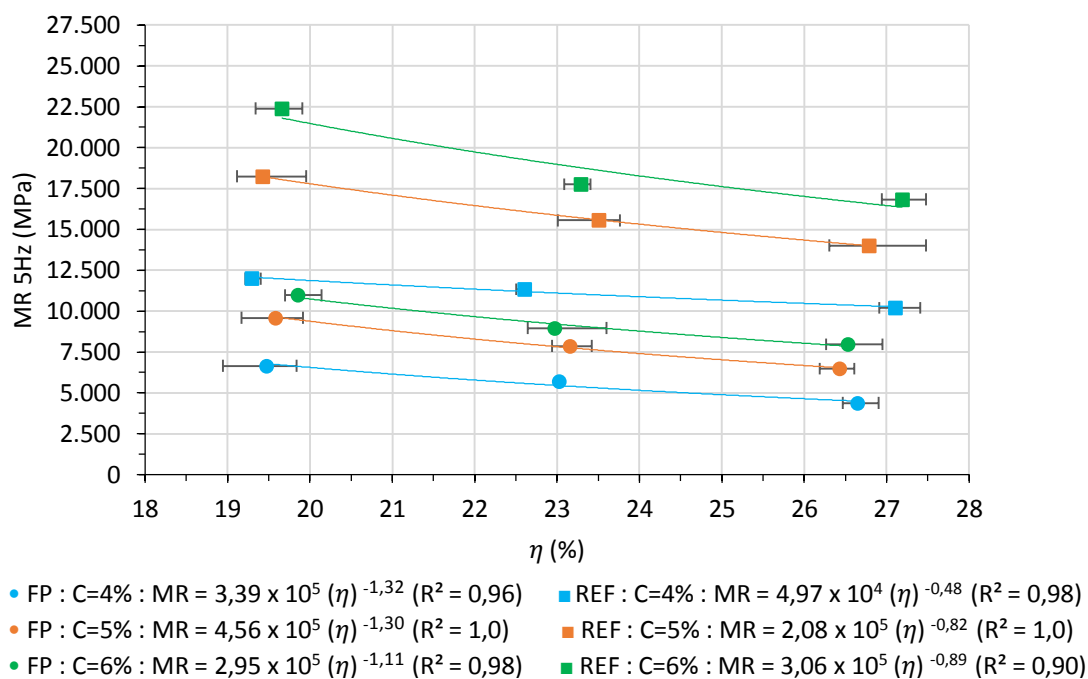
Fonte: Autor.

Figura 43 – Variação da RTCD em relação à porosidade para 28 dias de cura



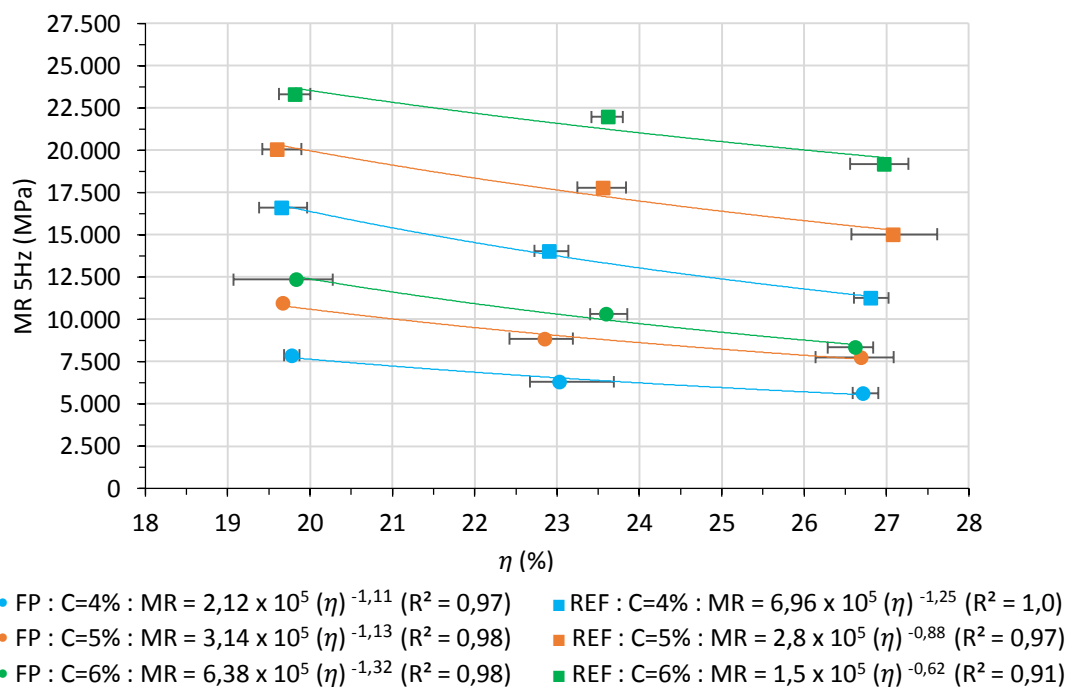
Fonte: Autor.

Figura 44 – Variação do MR 5Hz em relação à porosidade para 7 dias de cura



Fonte: Autor.

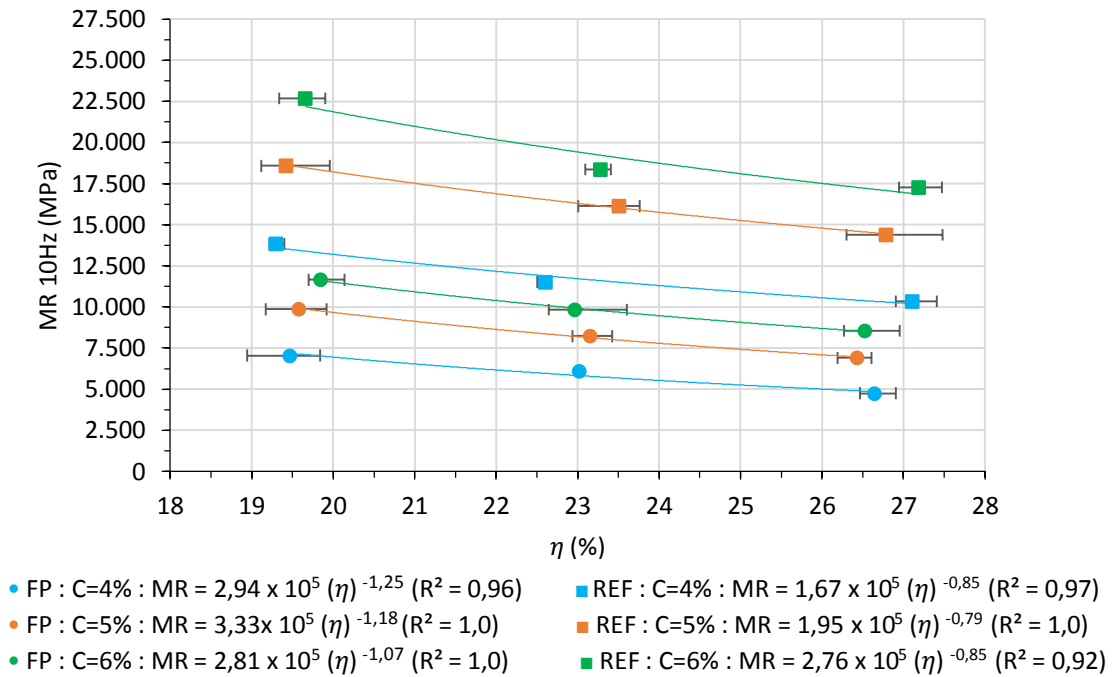
Figura 45 – Variação do MR 5Hz em relação à porosidade para 28 dias de cura



Fonte: Autor.

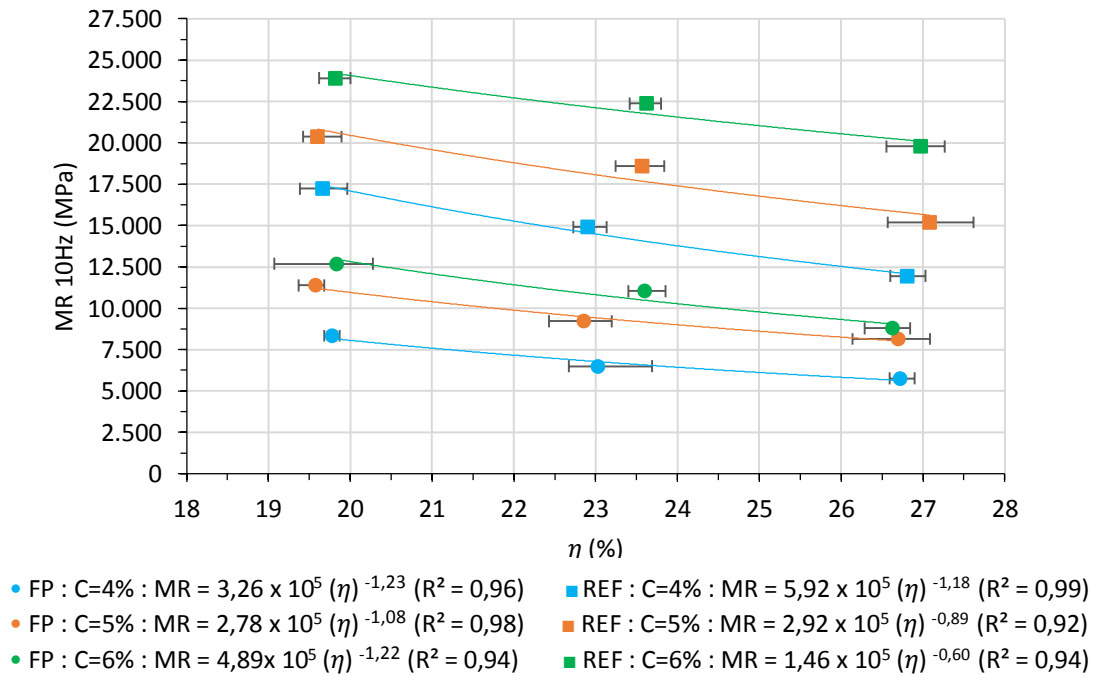


Figura 46 – Variação do MR 10Hz em relação à porosidade para 7 dias de cura



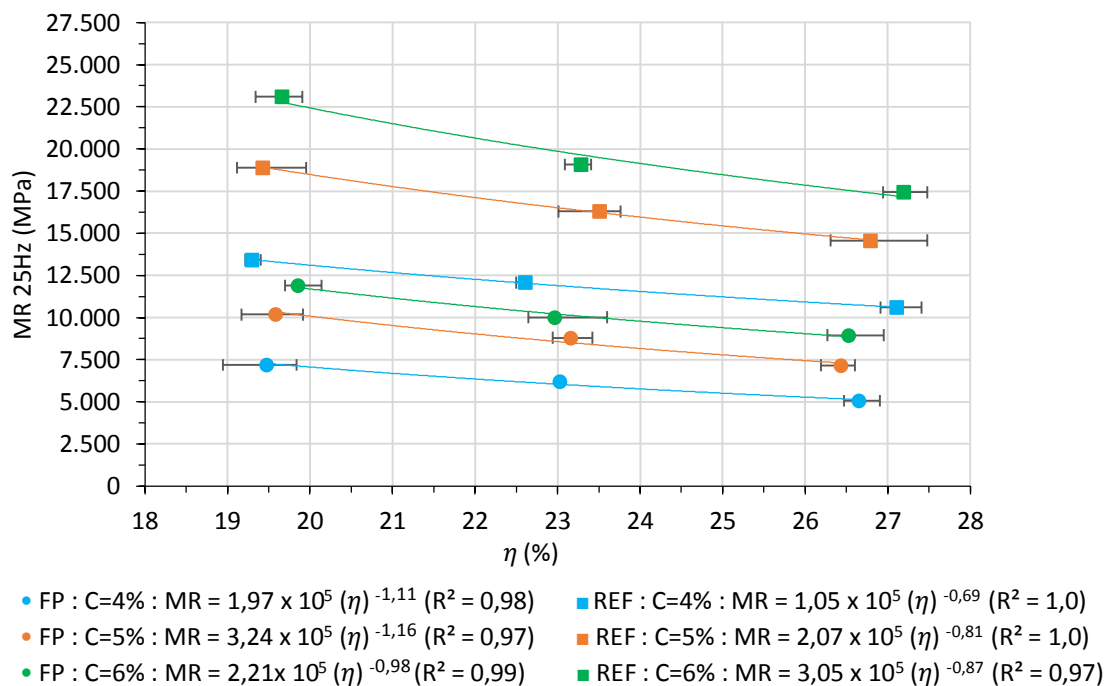
Fonte: Autor.

Figura 47 – Variação do MR 10Hz em relação à porosidade para 28 dias de cura



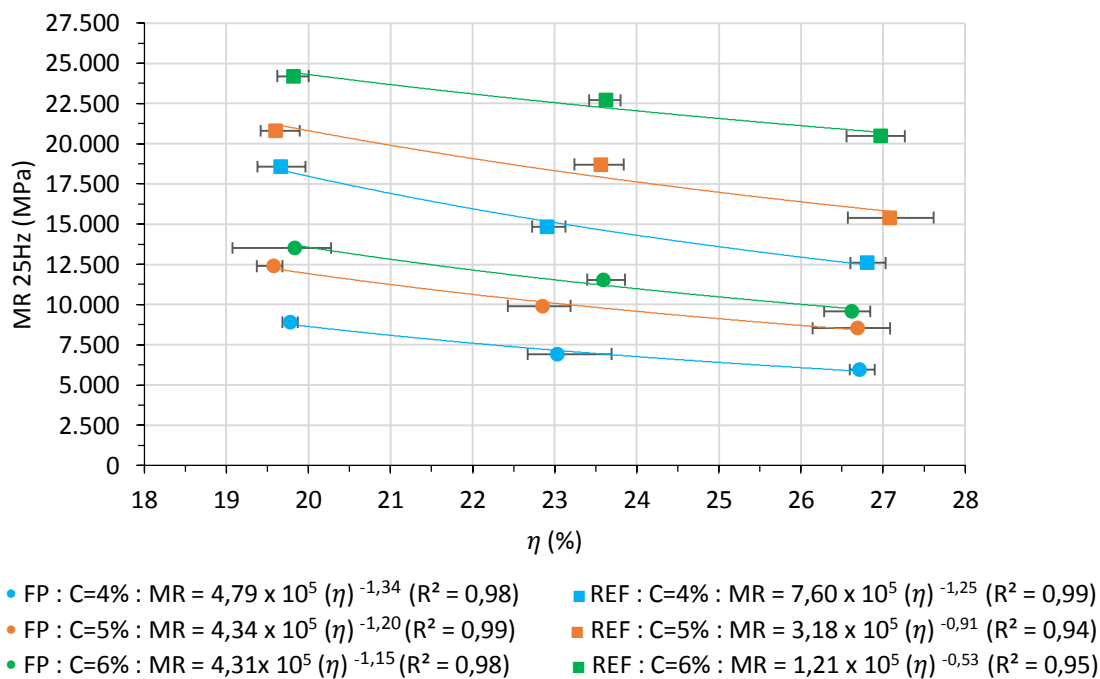
Fonte: Autor.

Figura 48 – Variação do MR 25Hz em relação à porosidade para 7 dias de cura



Fonte: Autor.

Figura 49 – Variação do MR 25Hz em relação à porosidade para 28 dias de cura



Fonte: Autor.

Analisando-se as Figuras 38 a 49, verificou-se que a redução de porosidade afeta consideravelmente a resistência à compressão e tração, ao ponto que para os módulos, mesmo ensaiados em diferentes frequências, o aumento foi moderado. A porosidade dos corpos de prova foi obtida através da variação da densidade das misturas (1,90; 2,00 e 2,10 g/cm<sup>3</sup>) e calculada a partir da Equação 9 e 10, de acordo com o tipo de agregado utilizado.

Pela análise das barras de dispersão, percebe-se um baixo desvio padrão verificado nas amostras, isso se deve principalmente ao controle de qualidade adotado na pesquisa. Com isso, obteve-se em todos os CPs, para a mesma densidade utilizada, valores de porosidade similares.

Os valores médios de porosidade para cada massa específica foram: 26,8% para  $\gamma_d = 1,90$  g/cm<sup>3</sup>; 23,21% para  $\gamma_d = 2,0$  g/cm<sup>3</sup> e 19,58% para  $\gamma_d = 2,1$  g/cm<sup>3</sup>. Subtraindo-se as diferenças entre as porosidades, obteve-se 3,59% entre 1,90 e 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 3,63% entre 2,0 e 2,1 g/cm<sup>3</sup>, valores esses que indicariam um comportamento linear das misturas. Entretanto, o comportamento divergiu em relação ao ensaio analisado. Como já supracitado, por apresentarem um melhor ajuste dos resultados, foram utilizadas linhas de tendência do tipo potencial para os gráficos, mas se percebeu que os ensaios de resistência (RCS, RTF e RTCD) apresentaram um aumento exponencial com a redução da porosidade, já os ensaios de rigidez apresentaram um aumento praticamente linear. Em pontos percentuais, o aumento médio de resistência entre a menor e maior densidade das misturas foi de 81,54% e para os módulos foi de 31,54%. Para essa diferença nos resultados de rigidez e resistência, frente a redução da porosidade, não se obteve uma conclusão plausível sobre o que poderia estar gerando tal ocorrência.

O efeito benéfico em termos de aumento de resistência com a diminuição da porosidade tem sido reportado em diversos trabalhos (CLOUGH *et al.*, 1981; DALLA ROSA, 2009; FOPPA, 2005; INGLES; METCALF, 1972; ISMAIL *et al.*, 2002; PASCHE, 2016). O mecanismo pelo qual a redução na porosidade influencia o aumento na resistência das misturas granulares cimentadas aparenta estar relacionado com um aspecto principal: a existência de um maior número de contatos e maior intertravamento entre as partículas do agregado. Com a maior proximidade e existência de um maior número de contatos entre as partículas do agregado, os produtos da hidratação do cimento têm mais chances de promover ligações efetivas

entre as mesmas, ou seja, partícula a partícula. Outro ponto, conjuntamente resultado do maior número de contatos entre as partículas, é o maior atrito que pode ser mobilizado em reação às tensões aplicadas, da mesma maneira que a existência de um maior intertravamento.

De acordo com Clough *et al.* (1981), a inserção de um agente cimentante gera um material com duas parcelas de resistência: uma correspondente à cimentação e outra devido ao atrito. A cimentação é mobilizada primeiro, a pequenas deformações, enquanto que o atrito é mobilizado a grandes deformações.

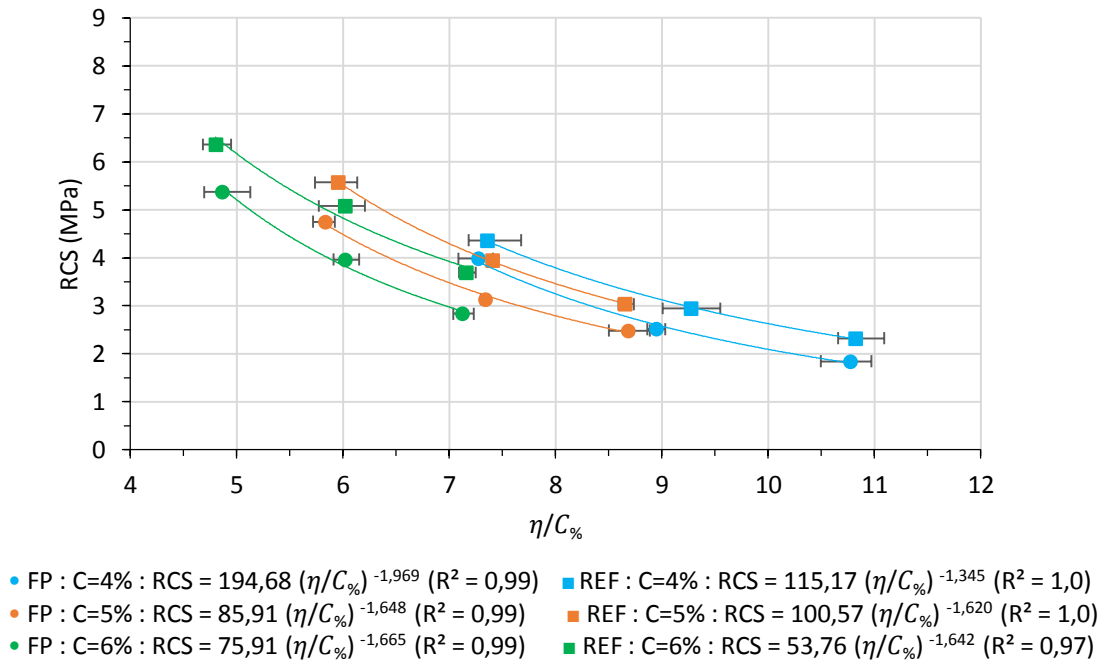
Por esse motivo, entende-se que o efeito do ganho de resistência e rigidez com a redução na porosidade das misturas estudadas é predominantemente causado pela cimentação mais efetiva, em função da redução da porosidade do material e conseqüentemente maior número de contatos entre as partículas existente. Além disso, a maior eficácia na distribuição das tensões no interior do corpo de prova, bem como a maior capacidade de gerar atrito devido à redução de porosidade contribui para o ganho de resistência do material.

Outro fator preponderante que se retira da análise do efeito da porosidade é o aumento do teor de cimento volumétrico (volume de cimento dividido pelo volume total do corpo de prova, calculado pela Equação 11) para um mesmo teor de cimento dosado em relação à massa de agregado seco. Ou seja, para misturas com mesmo teor de cimento, à medida que a massa específica aparente seca aumenta, há um maior volume de cimento por unidade de volume de vazios do CP.

#### 4.3 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO

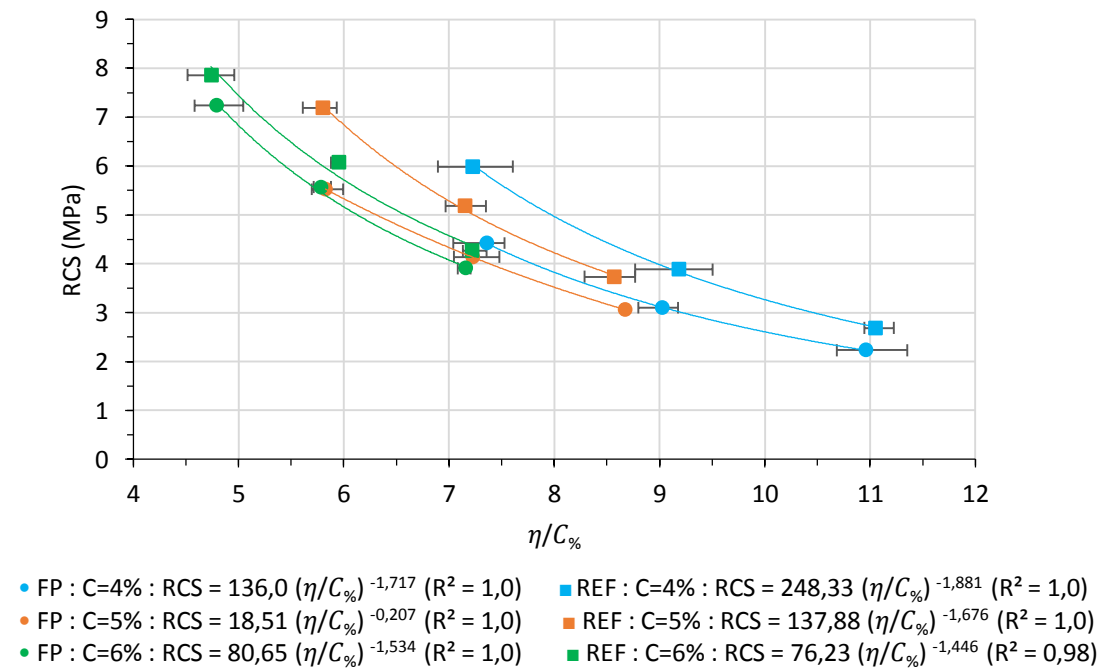
Nas Figuras 50 a 61 são apresentados os resultados da variação de resistências e módulos obtidos em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento para cada mistura e tempos de cura utilizados. Cada ponto corresponde à média de resistência de três corpos de prova moldados com características idênticas.

Figura 50 – Variação da RCS versus relação  $\eta/C_0$  para 7 dias de cura

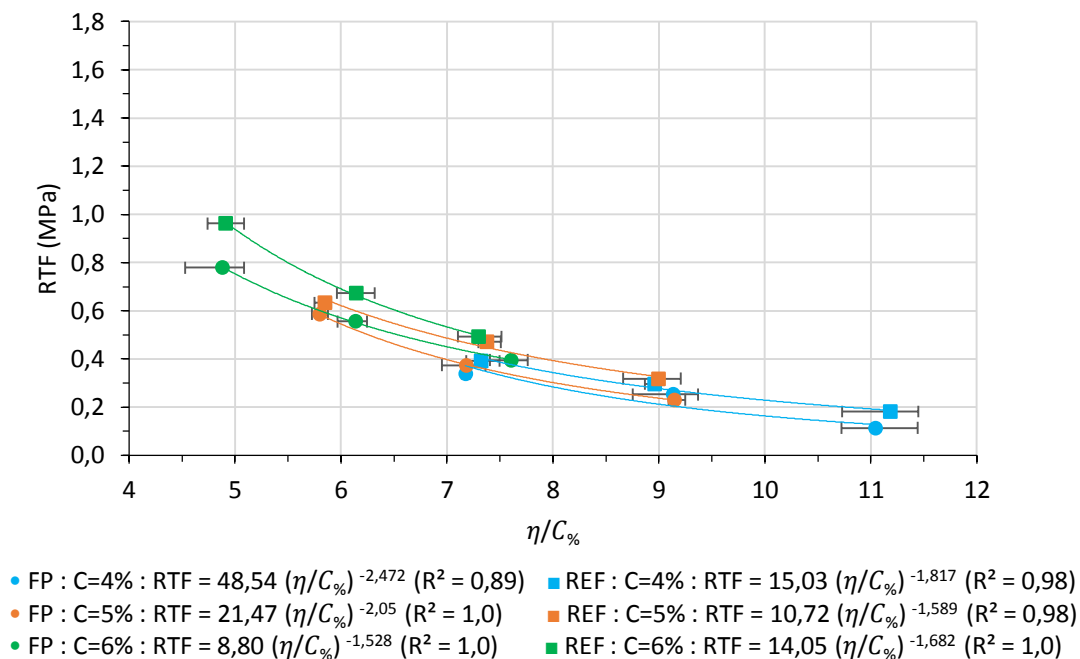


Fonte: Autor.

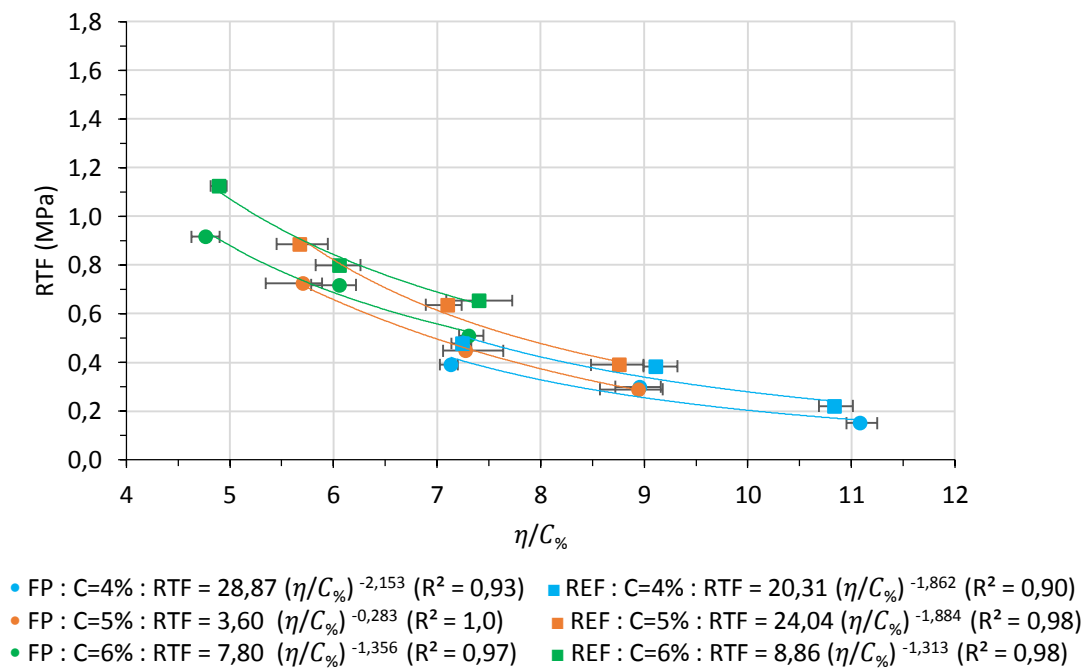
Figura 51 – Variação da RCS versus relação  $\eta/C_0$  para 28 dias de cura



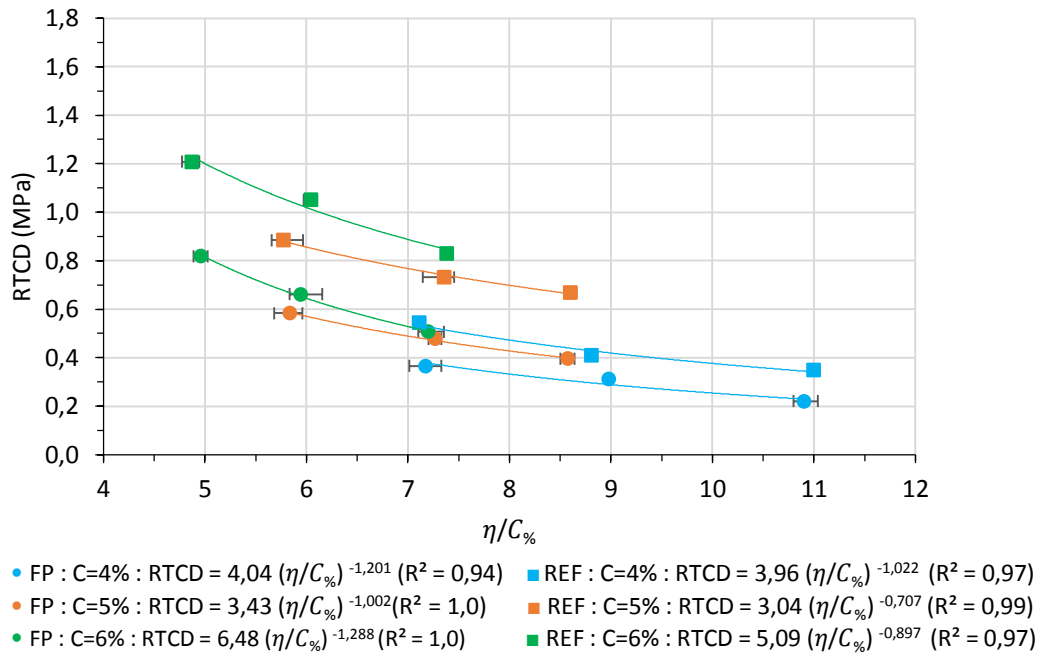
Fonte: Autor.

Figura 52 – Variação da RTF versus relação  $\eta/C_{\%}$  para 7 dias de cura

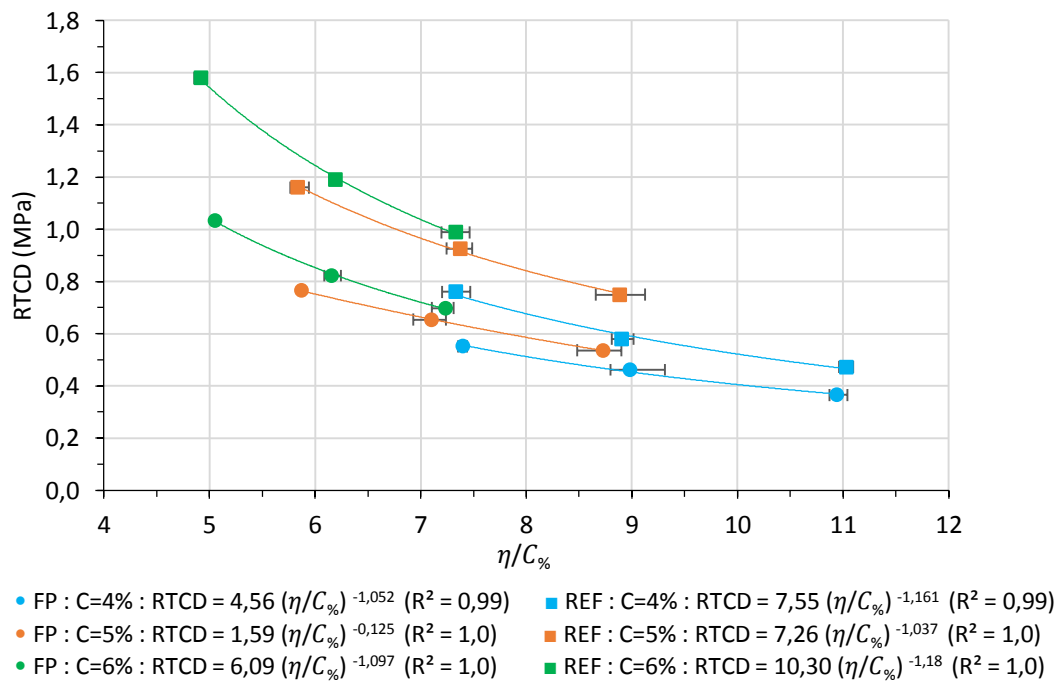
Fonte: Autor.

Figura 53 – Variação da RTF versus relação  $\eta/C_{\%}$  para 28 dias de cura

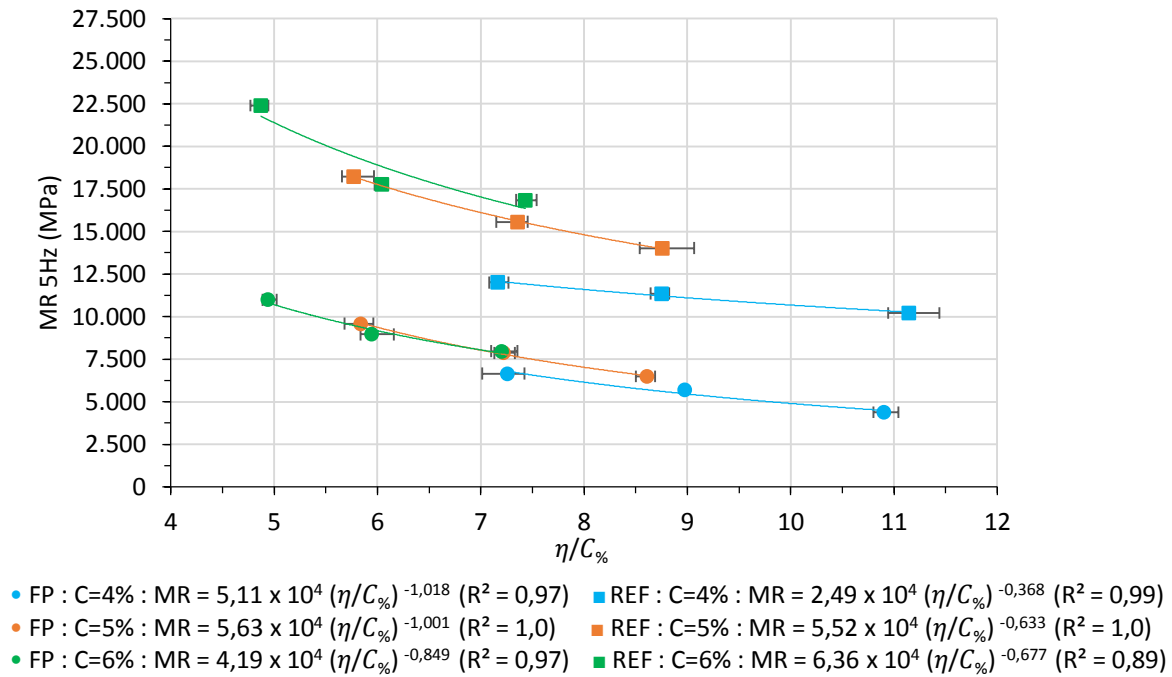
Fonte: Autor.

Figura 54 – Variação da RTCD versus relação  $\eta/C_{\%}$  para 7 dias de cura

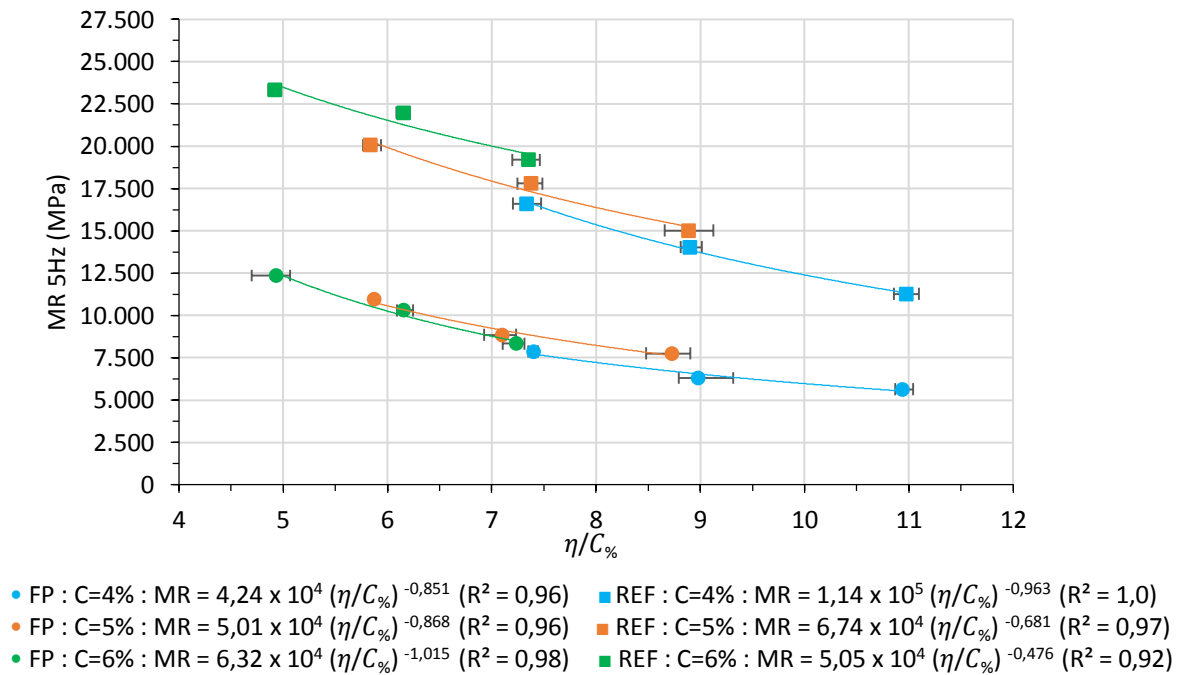
Fonte: Autor.

Figura 55 – Variação da RTCD versus relação  $\eta/C_{\%}$  para 28 dias de cura

Fonte: Autor.

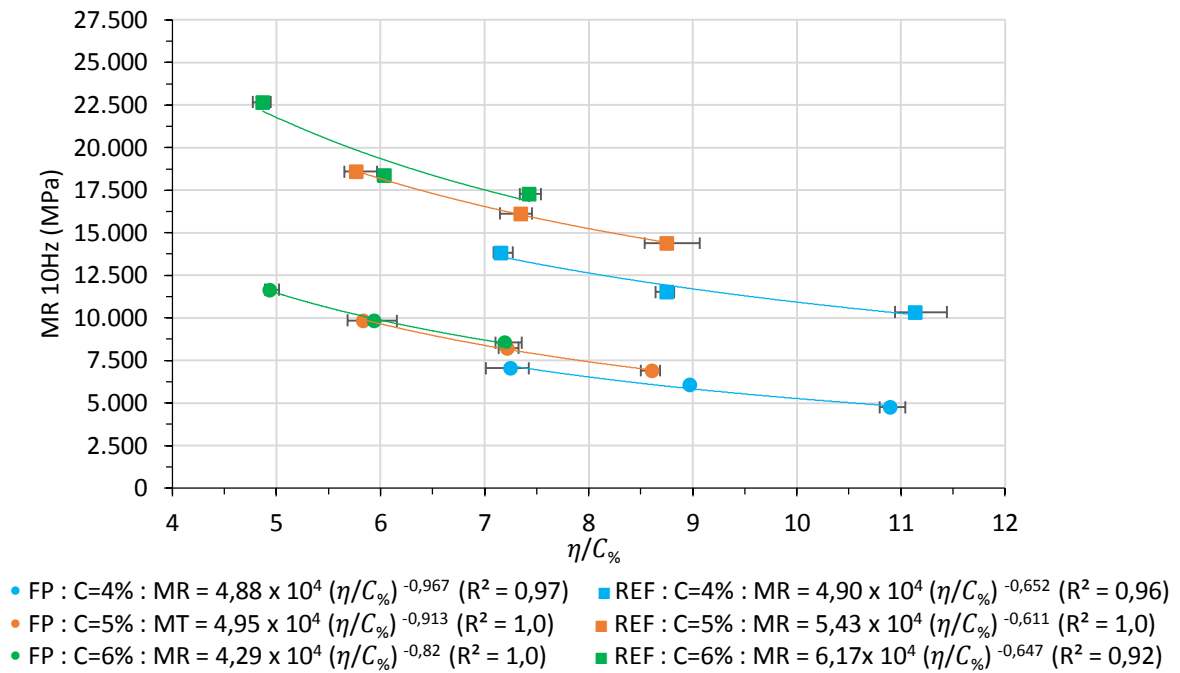
Figura 56 – Variação do MR 5Hz versus relação  $\eta/C_{\%}$  para 7 dias de cura

Fonte: Autor.

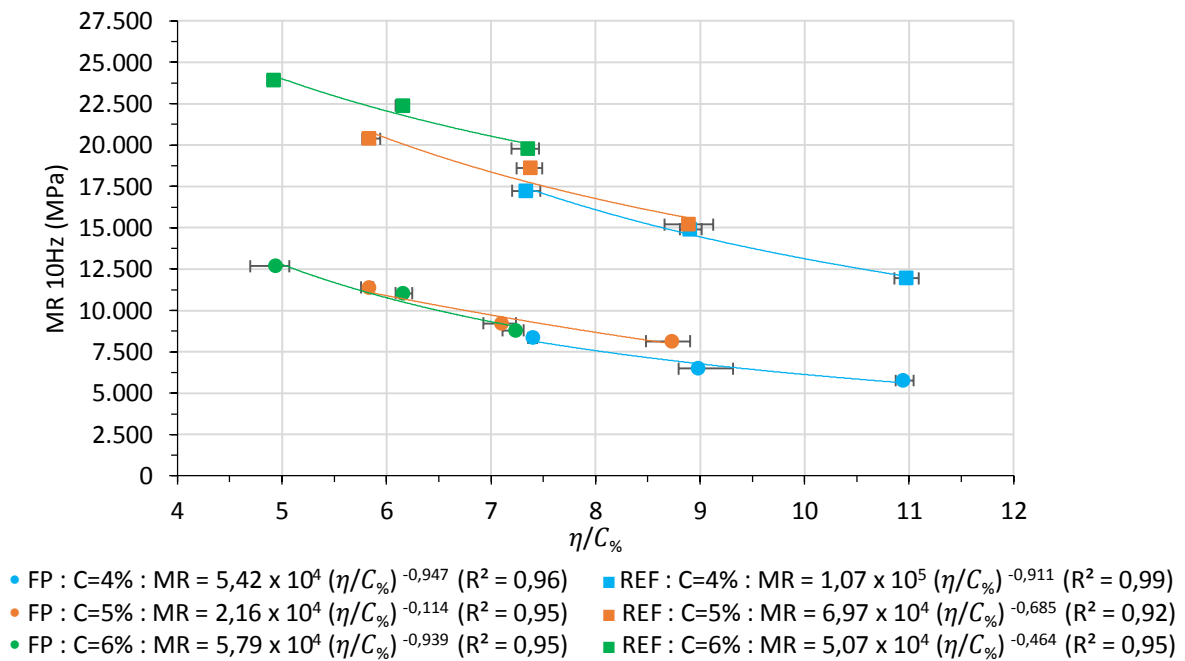
Figura 57 – Variação do MR 5Hz versus relação  $\eta/C_{\%}$  para 28 dias de cura

Fonte: Autor.

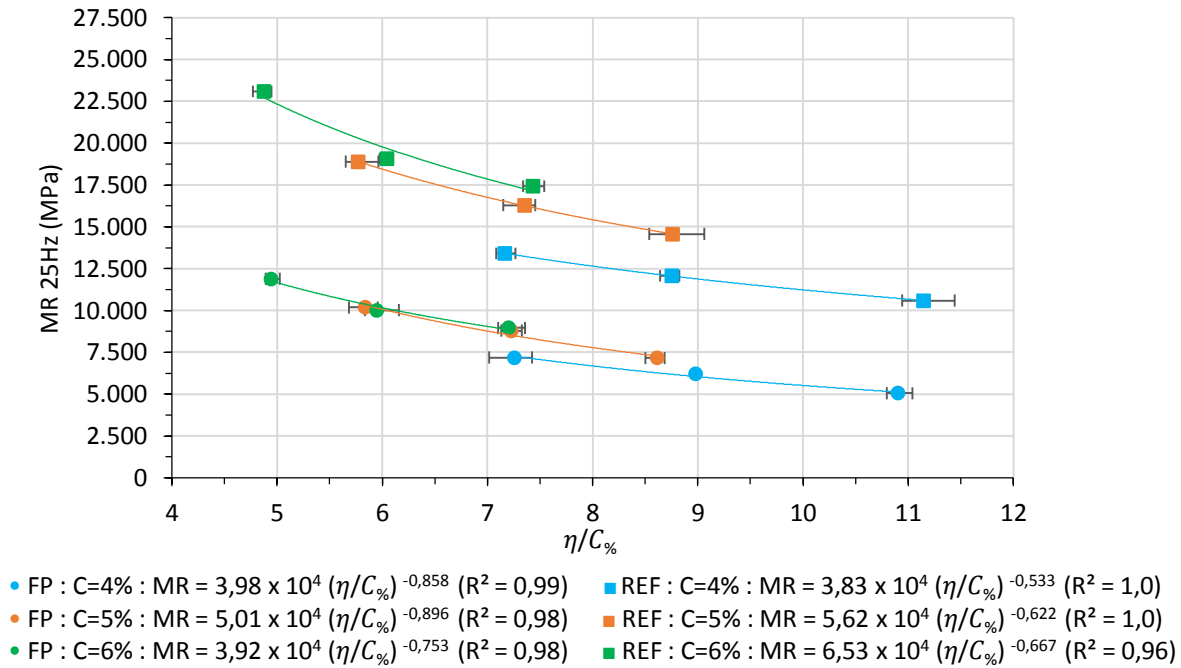


Figura 58 – Variação do MR 10Hz versus relação  $\eta/C_0$  para 7 dias de cura

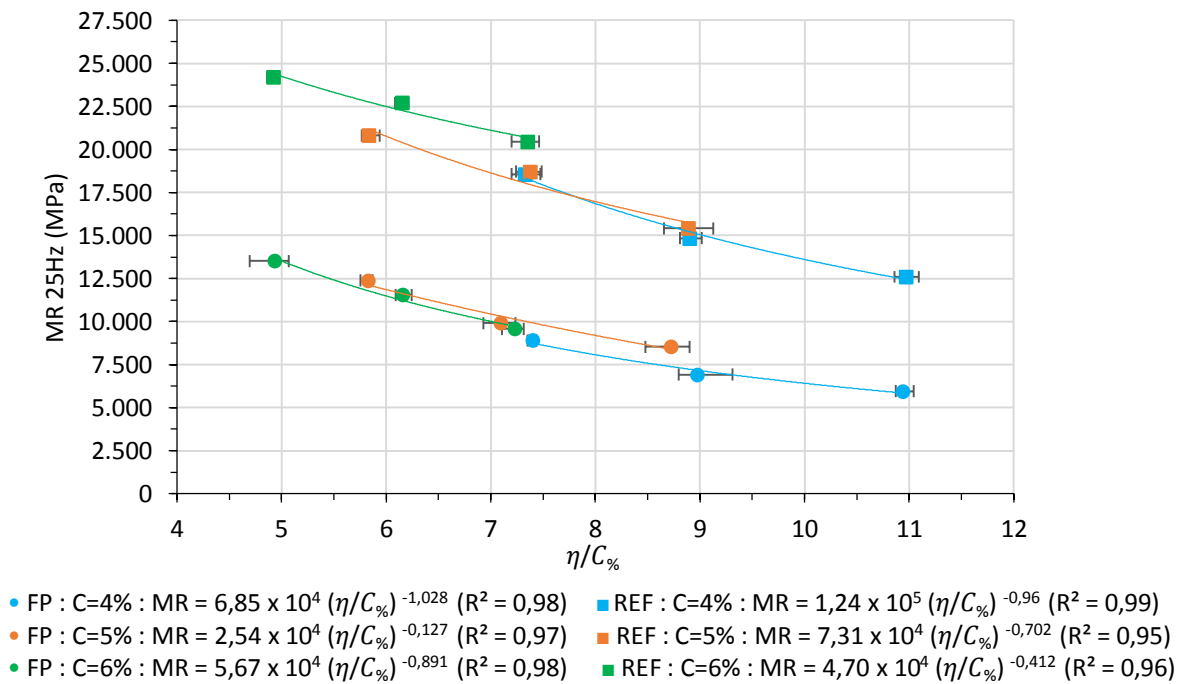
Fonte: Autor.

Figura 59 – Variação do MR 10Hz versus relação  $\eta/C_0$  para 28 dias de cura

Fonte: Autor.

Figura 60 – Variação do MR 25Hz versus relação  $\eta/C_{\%}$  para 7 dias de cura

Fonte: Autor.

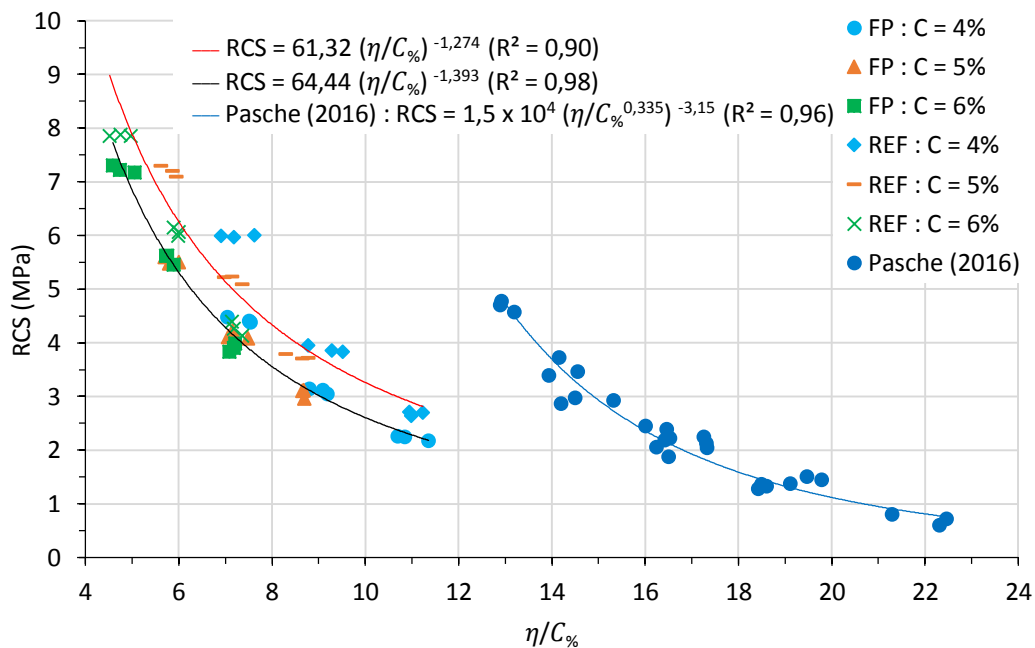
Figura 61 – Variação do MR 25Hz versus relação  $\eta/C_{\%}$  para 28 dias de cura

Fonte: Autor.

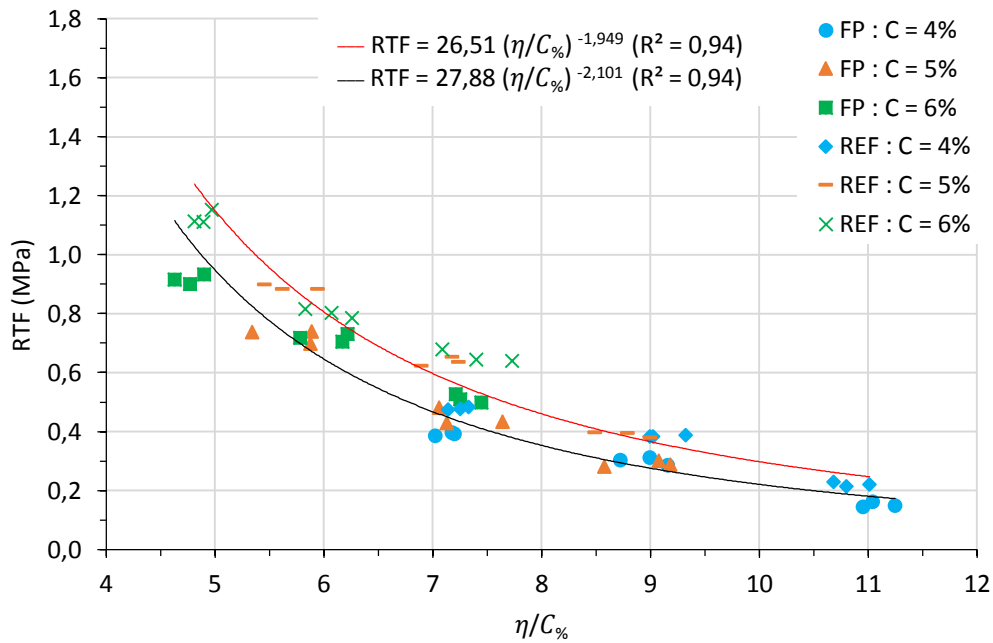
Pode-se observar nas Figuras 50 a 61 que independentemente se a composição granulométrica foi composta de fresado ou agregados naturais, aparenta existir uma correlação única entre a resistência e rigidez do ensaio realizado com sua relação  $\eta/C_0$ . Para o cálculo das curvas de ajuste de cada mistura e comparação com o trabalho de Pasche (2016), os resultados foram agrupados de acordo com o agregado utilizado. Cada curva representa uma mesma matriz pétreia com os três diferentes teores de cimento e massas específicas.

As Figuras 62 a 67 ilustram o ajuste para cada ensaio para o tempo de cura de 28 dias. Serão apresentados apenas os modelos matemáticos para esse tempo de cura, seguindo-se as recomendações das especificações quanto à resistência final do cimento e reciclagem de pavimentos (DNIT-ES 167/2013). Nos ensaios de RCS, RTCD e MR 10Hz também serão apresentadas as curvas de ajuste obtidas na pesquisa de Pasche (2016).

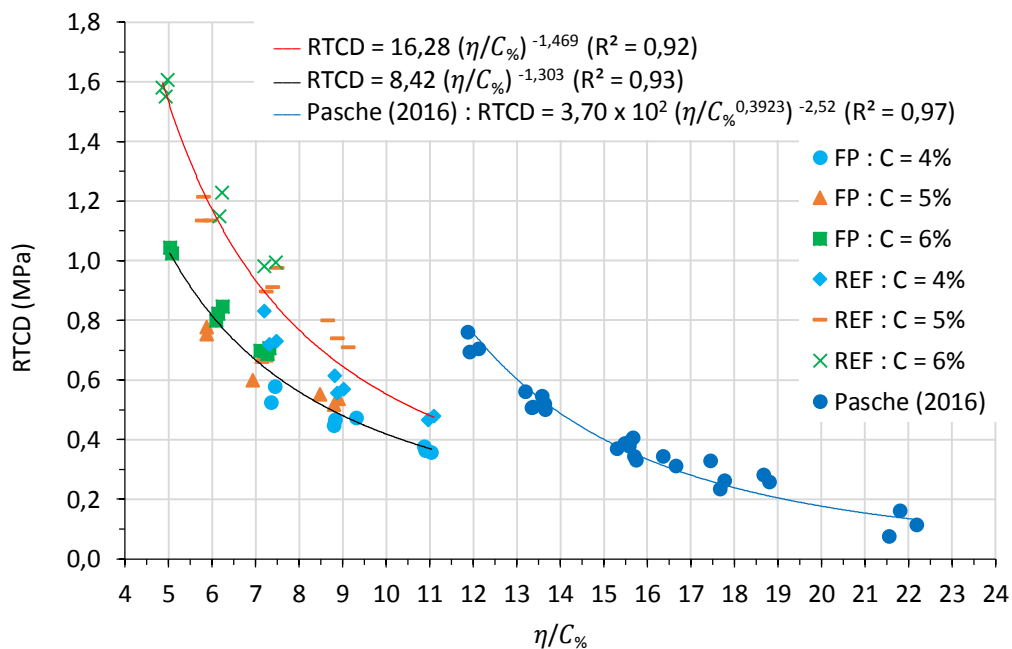
Figura 62 – Variação da RCS versus relação  $\eta/C_0$  ajustada



Fonte: Autor.

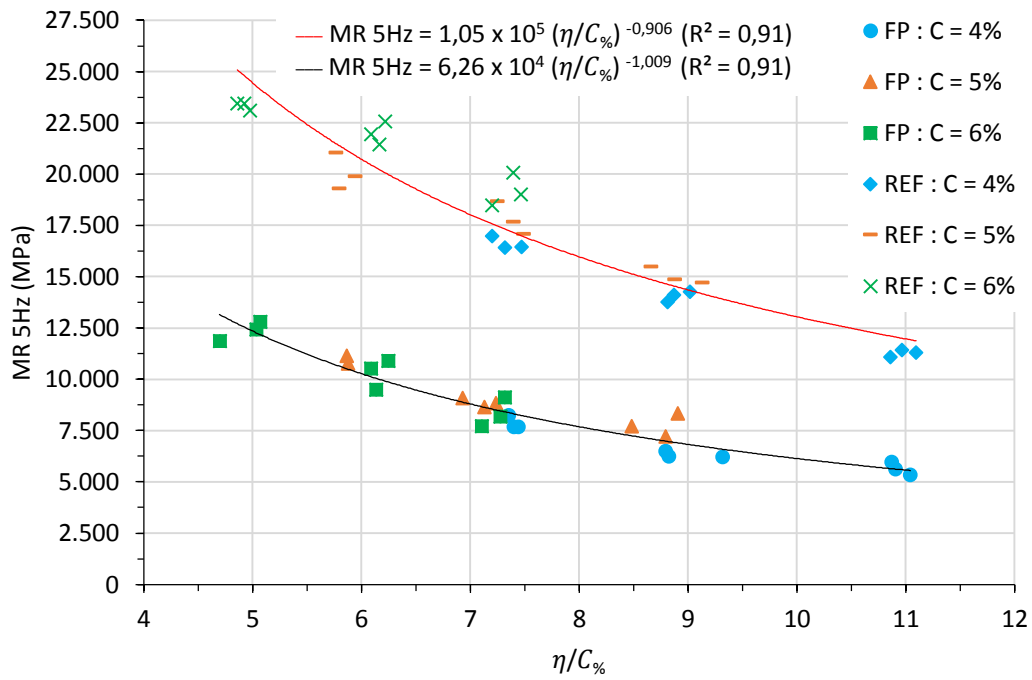
Figura 63 – Variação da RTF versus relação  $\eta/C_{\%}$  ajustada

Fonte: Autor.

Figura 64 – Variação da RTCD versus relação  $\eta/C_{\%}$  ajustada

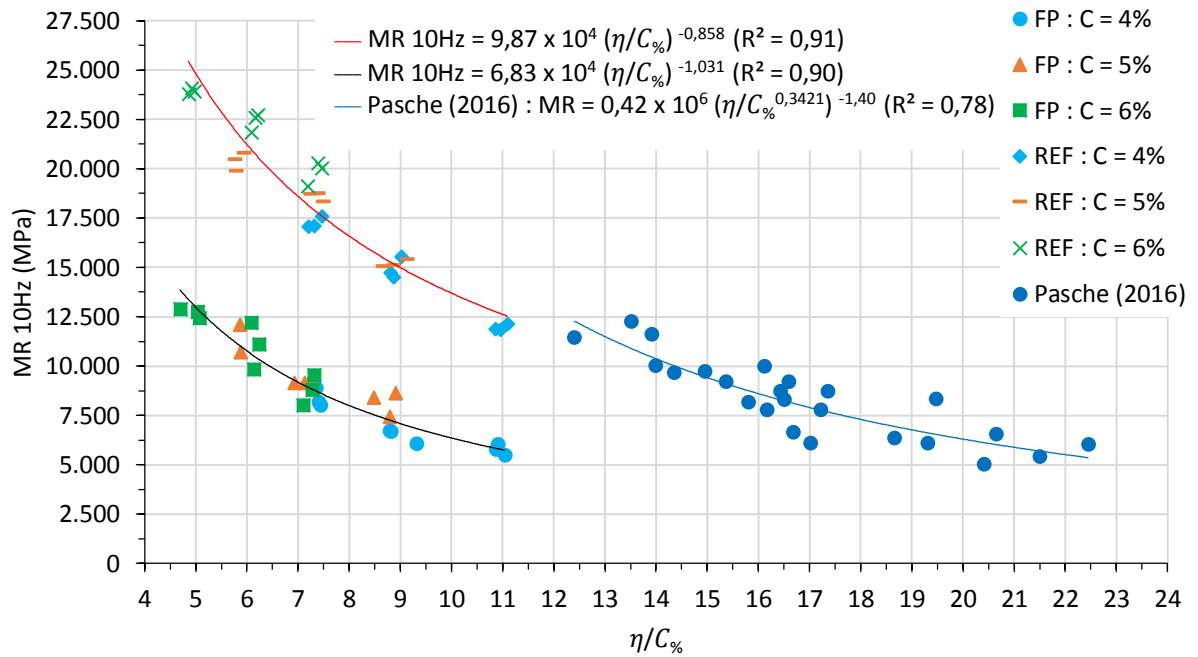
Fonte: Autor.

Figura 65 – Variação do MR 5Hz versus relação  $\eta/C_{\%}$  ajustada

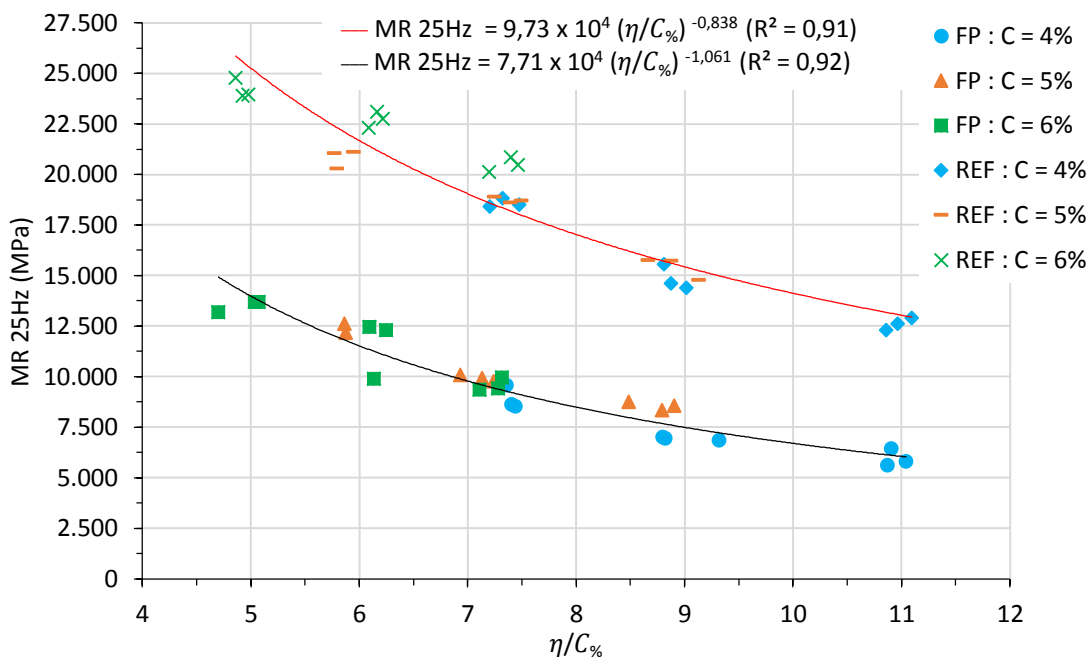


Fonte: Autor.

Figura 66 – Variação do MR 10Hz versus relação  $\eta/C_{\%}$  ajustada



Fonte: Autor.

Figura 67 – Variação do MR 25Hz versus relação  $\eta/C_{\%}$  ajustada

Fonte: Autor.

Nota-se que a resistência e rigidez das misturas estudadas podem ser avaliadas, com um excelente grau de precisão, através da relação porosidade/teor volumétrico de cimento. Verifica-se a partir das Figuras 62, 64 e 66 que essa característica só foi verificada nos estudos de Pasche (2016) após o autor ajustar, com o uso de uma potência, o parâmetro teor volumétrico de cimento da relação  $\eta/C_{\%}$  para que pudesse compatibilizar as taxas de variação e conseguisse um melhor ajuste de suas curvas. As principais diferenças verificadas entre os modelos apresentados por Pasche (2016) e os encontrados nesta pesquisa se deve principalmente pelo material fresado utilizado, dado que, o RAP apresenta uma heterogeneidade muito grande devido ao seu processo de fresagem e as características originais da mistura asfáltica.

A grande importância da relação  $\eta/C_{\%}$  se evidencia através da análise dos resultados. Percebe-se que independentemente do ensaio realizado a relação demonstrou um excelente ajuste das curvas. Um ponto importante, comum a todos os ensaios, foi verificado quando a relação  $\eta/C_{\%}$  se aproxima de 7, neste ponto observa-se que ao dimensionar uma camada cimentada com 4% de cimento

utilizando energia modificada, 5% de cimento com energia intermediária e 6% de cimento com energia normal se obtêm praticamente as mesmas resistências e rigidezes para a matriz pétreia adotada. Sendo assim, através dos modelos obtidos o projetista pode, empregando o fator porosidade/teor volumétrico de cimento, adotar adequadamente a quantidade de cimento e a energia de compactação para possibilitar uma mistura que cumpra com as resistências necessárias aos projetos ao menor custo possível.

Outra utilização de extrema importância que se obtém através da relação  $\eta/C_{\%}$  é no controle da execução das camadas cimentadas. Tendo em vista que, constatada uma compactação inferior à estabelecida, poderá o executor estimar com segurança a perda de resistência e rigidez da camada e conseqüentemente poderão ser adotadas medidas reparadoras como, por exemplo, o reforço da estrutura ou ainda, a diminuição do carregamento transmitido.

#### 4.4 RELACÃO MR/RTCD

Uma das principais características que se obtém com a utilização de misturas estabilizadas com cimento é uma elevada rigidez do material. Entretanto, a análise dos resultados do módulo de resiliência é bastante complexa, visto que modificando a estrutura onde o material será utilizado, pode-se aceitar valores maiores ou menores de MR. Em seu estudo, Balbo (2006) relata os problemas da incorporação de BGTC nas estruturas de pavimentos para rodovias de tráfego pesado, principalmente por esse material possuir 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 ao fenômeno de fadiga).

Uma das formas adotadas por pesquisadores como Pires (2014) e Pasche (2016) para avaliar a problemática que envolve a alta rigidez dos materiais cimentados é estudar a relação MR/RTCD. Essa relação se torna importante para avaliar a durabilidade da camada cimentada, dado que misturas muito rígidas acabam por suportar a maioria dos esforços transmitidos do tráfego e conseqüentemente necessitam de uma elevada resistência à tração decorrente da concentração de esforços no seu interior. Logo, menores relações entre MR/RTCD podem indicar um material com melhores propriedades mecânicas.

Analisando a Tabela 13, percebe-se que as misturas que apresentaram as menores relações MR/RTCD foram as que continham a matriz pétreia formada por 70% material fresado e 30% pó de pedra. Isso se deve principalmente pelo MR das misturas de BGTC ser o dobro das misturas com RAP, ao ponto que a RTCD das misturas com fresado ser de aproximadamente 70% da resistência da BGTC. Essa análise pode evidenciar que do ponto de vista da rigidez *versus* resistência à tração, pode-se dizer que 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.

Verifica-se também que o aumento da massa específica e do teor de cimento influenciaram principalmente no aumento da RTCD, fazendo com que a relação MR/RTCD diminuísse. Além disso, mantendo-se constante o teor de cimento e variando a massa específica, não houve alteração significativa no valor da relação MR/RTCD.



Tabela 13 – Relação MR/RTCD

Cimento (%)	Dias de Cura	Massa Específica Aparente Seca	MATERIAL FRESADO			BGTC		
			MR (MPa)	RTCD (MPa)	MR/RTCD	MR (MPa)	RTCD (MPa)	MR/RTCD
4	7	1,9	4742	0,22	21524	10340	0,35	29638
		2,0	6083	0,31	19502	11524	0,41	28045
		2,1	7042	0,37	19225	13835	0,55	25385
	28	1,9	5760	0,37	15759	11944	0,47	25271
		2,0	6488	0,46	14050	14912	0,58	25729
		2,1	8344	0,55	15135	17234	0,76	22659
5	7	1,9	6905	0,40	17429	14388	0,67	21521
		2,0	8231	0,48	17240	16128	0,73	22018
		2,1	9855	0,58	16892	18582	0,88	21007
	28	1,9	8142	0,54	15191	15190	0,75	20280
		2,0	9215	0,65	14103	18596	0,93	20075
		2,1	11382	0,77	14862	20380	1,16	17562
6	7	1,9	8550	0,51	16874	17267	0,83	20778
		2,0	9830	0,66	14863	18362	1,05	17481
		2,1	11649	0,82	14229	22675	1,21	18770
	28	1,9	8788	0,70	12588	19786	0,99	20026
		2,0	11038	0,82	13419	22372	1,19	18814
		2,1	12685	1,03	12264	23912	1,58	15143

Fonte: Autor.

#### 4.5 TENACIDADE, ÍNDICE DE TENACIDADE E ENERGIA DE FRATURA

Neste trabalho foi possível calcular os parâmetros de tenacidade, índice de tenacidade e energia de fratura a partir do ensaio de RTCD para todas as misturas avaliadas. As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam os valores individuais atingidos por cada corpo de prova, assim como sua média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Fazendo uma análise global dos resultados, percebe-se que, com exceção do parâmetro índice de tenacidade, todos os outros parâmetros obtiveram as seguintes características:

- a) incremento das propriedades mecânicas com o aumento do teor de cimento e com a evolução do tempo de cura de 7 para 28 dias;

b) baixo coeficiente de variação, sendo: 4% para RTCD; 12% para tenacidade; 17% para energia P máx e 19% para energia total. O CV para o IT ficou em torno de 48%;

Com relação à variação da massa específica aparente seca, observou-se o aumento da resistência à tração com o acréscimo de densidade. Contudo as demais propriedades não demonstraram um padrão coerente. Um banco de dados regional está sendo montado e é esperado que este possa fornecer tendências e limites para misturas no futuro.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de RTCD e parâmetros de tenacidade, Energias, IT bem como suas médias, DP e CV de cada mistura com teor de cimento de 4%

Dias de cura	Y <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	MISTURA FP4						MISTURA REF4						
		CP	RTCD (MPa)	Tenacidade (N/mm)	Energy PMax (N*m)	Energy Total (N*m)	IT	CP	RTCD (MPa)	Tenacidade (N/mm)	Energy PMax (N*m)	Energy Total (N*m)	IT	
7	1,9	1A	0,22	0,042	0,81	4,00	0,058	1A	-	-	-	-	-	-
		2A	0,21	0,057	1,35	3,12	0,020	2A	0,37	0,046	0,93	3,90	0,052	
		3A	0,23	0,045	0,91	3,14	0,055	3A	0,32	0,045	0,76	3,89	0,070	
		Média	0,22	0,05	1,02	3,42	0,04	Média	0,35	0,05	0,84	3,89	0,06	
		DP	0,01	0,01	0,28	0,50	0,02	DP	0,04	0,00	0,12	0,01	0,01	
		CV	5%	16%	28%	15%	47%	CV	10%	2%	15%	0%	20%	
	2,0	4A	0,29	0,076	1,79	4,66	0,042	4A	0,44	0,082	1,86	5,69	0,043	
		5A	0,37	0,081	1,80	6,14	0,065	5A	-	-	-	-	-	
		6A	0,28	0,046	0,88	5,37	0,121	6A	0,39	0,062	1,09	5,78	0,091	
		Média	0,31	0,07	1,49	5,39	0,08	Média	0,42	0,07	1,48	5,73	0,07	
		DP	0,05	0,02	0,53	0,74	0,04	DP	0,04	0,01	0,55	0,07	0,03	
		CV	16%	28%	36%	14%	54%	CV	9%	20%	37%	1%	51%	
2,1	8A	0,35	0,053	0,89	5,76	0,105	8A	0,52	0,043	0,64	6,21	0,107		
	9A	0,38	0,061	1,17	6,97	0,114	9A	0,57	0,049	0,82	6,52	0,108		
	Média	0,37	0,06	1,03	6,37	0,11	Média	0,55	0,05	0,73	6,37	0,11		
	DP	0,02	0,01	0,20	0,86	0,01	DP	0,04	0,00	0,13	0,22	0,00		
	CV	6%	10%	20%	13%	6%	CV	6%	9%	17%	3%	1%		
28	1,9	1B	0,38	0,054	0,98	4,99	0,079	1B	-	-	-	-	-	
		2B	0,36	0,069	1,32	6,59	0,079	2B	0,48	0,031	1,00	3,90	0,042	
		3B	0,36	0,058	1,13	4,05	0,106	3B	0,47	0,050	0,88	3,67	0,041	
		Média	0,37	0,06	1,15	5,21	0,09	Média	0,48	0,04	0,94	3,79	0,04	
		DP	0,01	0,01	0,17	1,28	0,02	DP	0,01	0,01	0,08	0,16	0,00	
		CV	3%	13%	15%	25%	18%	CV	1%	35%	9%	4%	2%	
	2,0	4B	0,47	0,078	1,57	6,35	0,048	4B	0,57	0,093	1,64	6,28	0,051	
		5B	0,45	0,084	1,60	7,10	0,052	5B	0,61	0,066	1,16	7,41	0,091	
		6B	0,47	0,087	1,61	5,87	0,052	6B	0,57	0,072	1,43	6,25	0,065	
		Média	0,46	0,08	1,60	6,44	0,05	Média	0,58	0,08	1,41	6,64	0,07	
		DP	0,01	0,00	0,02	0,62	0,00	DP	0,02	0,01	0,24	0,66	0,02	
		CV	2%	6%	2%	10%	5%	CV	4%	19%	17%	10%	29%	
2,1	7B	-	-	-	-	-	7B	0,72	0,091	1,92	7,27	0,060		
	8B	0,58	0,104	1,73	10,29	0,107	8B	0,73	0,075	1,34	8,24	0,104		
	9B	0,53	0,080	1,48	8,89	0,110	9B	0,81	0,132	3,00	8,70	0,039		
	Média	0,56	0,09	1,60	9,59	0,11	Média	0,75	0,10	2,09	8,07	0,07		
	DP	0,04	0,02	0,18	0,99	0,00	DP	0,05	0,03	0,84	0,73	0,03		
	CV	6%	19%	11%	10%	2%	CV	7%	29%	40%	9%	49%		

Fonte: Autor.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de RTCD e parâmetros de tenacidade, Energias, IT bem como suas médias, DP e CV de cada mistura com teor de cimento de 5%

Dias de cura	Y <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	MISTURA FP5						MISTURA REF5					
		CP	RTCD (MPa)	Tenacidade (N/mm)	Energy PMax (N*m)	Energy Total (N*m)	IT	CP	RTCD (MPa)	Tenacidade (N/mm)	Energy PMax (N*m)	Energy Total (N*m)	IT
7	1,9	11A	0,41	0,062	1,11	5,55	0,074	11A	0,63	0,093	1,88	5,94	0,022
		12A	0,38	0,067	1,28	6,73	0,112	12A	0,70	0,089	1,67	6,03	0,023
		Média	0,40	0,06	1,19	6,14	0,09	Média	0,67	0,09	1,78	5,98	0,02
		DP	0,02	0,00	0,12	0,84	0,03	DP	0,05	0,00	0,15	0,06	0,00
		CV	5%	5%	10%	14%	29%	CV	7%	3%	8%	1%	3%
	2,0	13A	-	-	-	-	-	13A	0,71	0,083	1,54	5,29	0,019
		14A	0,47	0,091	2,09	5,87	0,033	14A	0,78	0,105	2,14	6,48	0,016
		15A	0,48	0,097	1,89	7,46	0,085	15A	0,70	0,081	1,28	5,26	0,029
		Média	0,48	0,09	1,99	6,66	0,06	Média	0,73	0,09	1,65	5,68	0,02
		DP	0,01	0,00	0,14	1,13	0,04	DP	0,04	0,01	0,44	0,70	0,01
		CV	1%	5%	7%	17%	63%	CV	6%	15%	27%	12%	31%
	2,1	16A	0,57	0,092	1,83	8,82	0,085	16A	0,89	0,183	3,82	9,87	0,014
		17A	0,60	0,125	2,61	8,95	0,060	17A	0,84	0,111	1,77	8,86	0,041
		18A	0,58	0,100	2,05	8,21	0,068	18A	0,93	0,105	1,90	6,55	0,020
		Média	0,58	0,11	2,16	8,66	0,07	Média	0,89	0,13	2,50	8,43	0,02
		DP	0,02	0,02	0,40	0,40	0,01	DP	0,05	0,04	1,15	1,70	0,01
	CV	3%	16%	19%	5%	19%	CV	5%	33%	46%	20%	58%	
	28	1,9	10B	0,52	0,100	1,82	8,86	0,086	10B	0,80	0,140	2,56	9,57
11B			0,54	0,099	1,76	7,90	0,046	11B	0,84	0,109	2,61	8,45	0,025
12B			0,52	0,081	1,56	7,47	0,084	12B	0,71	0,084	1,75	5,75	0,015
Média			0,53	0,09	1,72	8,08	0,07	Média	0,78	0,11	2,31	7,93	0,03
DP			0,01	0,01	0,14	0,71	0,02	DP	0,07	0,03	0,48	1,96	0,01
CV		2%	12%	8%	9%	32%	CV	8%	25%	21%	25%	47%	
2,0		13B	0,59	0,083	1,56	7,47	0,084	13B	0,89	0,181	3,02	14,89	0,073
		14B	0,68	0,098	1,76	8,74	0,068	14B	0,91	0,106	2,82	9,27	0,024
		15B	0,68	0,120	2,65	11,53	0,081	15B	0,97	0,104	2,69	5,93	0,046
		Média	0,65	0,10	1,99	9,25	0,08	Média	0,92	0,13	2,84	10,03	0,05
DP		0,05	0,02	0,58	2,08	0,01	DP	0,04	0,04	0,17	4,53	0,02	
CV		8%	19%	29%	22%	11%	CV	5%	34%	6%	45%	51%	
2,1		16B	0,78	0,121	2,69	6,81	0,018	16B	1,13	0,136	2,59	12,53	0,054
		17B	-	-	-	-	-	17B	1,21	0,162	3,65	10,67	0,017
		18B	0,75	0,117	2,69	6,11	0,013	18B	1,13	0,152	3,17	8,59	0,008
	Média	0,77	0,12	2,69	6,46	0,02	Média	1,16	0,15	3,14	10,60	0,03	
	DP	0,02	0,00	0,00	0,49	0,00	DP	0,05	0,01	0,53	1,97	0,02	
CV	3%	2%	0%	8%	22%	CV	4%	9%	17%	19%	93%		

Fonte: Autor.

Tabela 16 – Resultados do ensaio de RTCD e parâmetros de tenacidade, Energias, IT bem como suas médias, DP e CV de cada mistura com teor de cimento de 6%

Dias de cura	Y <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	MISTURA FP6						MISTURA REF6							
		CP	RTCD (MPa)	Tenacidade (N/mm)	Energy PMax (N*m)	Energy Total (N*m)	IT	CP	RTCD (MPa)	Tenacidade (N/mm)	Energy PMax (N*m)	Energy Total (N*m)	IT		
7	1,9	19A	0,53	0,106	2,34	5,79	0,020	19A	-	-	-	-	-	-	-
		20A	0,44	0,118	1,88	8,40	0,119	20A	0,85	0,093	2,60	5,54	0,003		
		21A	0,54	0,081	1,47	6,08	0,055	21A	0,81	0,128	2,30	8,65	0,056		
		Média	0,50	0,10	1,90	6,76	0,06	Média	0,83	0,11	2,45	7,09	0,03		
		DP	0,06	0,02	0,43	1,43	0,05	DP	0,03	0,02	0,21	2,20	0,04		
		CV	11%	18%	23%	21%	78%	CV	4%	22%	9%	31%	125%		
	2,0	22A	0,71	0,187	5,57	11,23	0,001	22A	1,02	0,180	4,11	9,47	0,014		
		23A	0,64	0,080	1,56	8,30	0,079	23A	1,08	0,211	5,50	14,01	0,024		
		24A	0,64	0,099	1,88	7,59	0,057	24A	1,05	0,201	4,28	13,64	0,048		
		Média	0,66	0,12	3,00	9,04	0,05	Média	1,05	0,20	4,63	12,38	0,03		
		DP	0,04	0,06	2,23	1,93	0,04	DP	0,03	0,02	0,76	2,52	0,02		
		CV	6%	47%	74%	21%	88%	CV	3%	8%	16%	20%	60%		
	2,1	25A	0,85	0,136	3,14	8,68	0,065	25A	1,21	0,237	5,63	23,26	0,073		
		26A	-	-	-	-	-	26A	1,13	0,229	6,13	11,93	0,066		
		27A	0,79	0,118	1,89	7,41	0,064	27A	1,29	0,231	5,18	11,70	0,007		
		Média	0,82	0,13	2,52	8,05	0,06	Média	1,21	0,23	5,65	15,63	0,05		
		DP	0,04	0,01	0,89	0,90	0,00	DP	0,08	0,00	0,48	6,61	0,04		
		CV	5%	10%	35%	11%	1%	CV	7%	2%	8%	42%	74%		
28	1,9	19B	0,71	0,132	2,98	8,97	0,036	19B	0,98	0,105	1,90	6,55	0,077		
		20B	0,70	0,129	2,46	10,88	0,081	20B	0,99	0,181	3,02	14,89	0,022		
		21B	0,69	0,127	2,36	11,91	0,121	21B	-	-	-	-	-		
		Média	0,70	0,13	2,60	10,59	0,08	Média	0,99	0,14	2,46	10,72	0,05		
		DP	0,01	0,00	0,34	1,49	0,04	DP	0,01	0,05	0,79	5,90	0,04		
		CV	1%	2%	13%	14%	53%	CV	1%	38%	32%	55%	79%		
	2,0	22B	0,85	0,127	2,40	9,22	0,050	22B	-	-	-	-	-		
		23B	0,83	0,119	2,34	7,84	0,036	23B	1,23	0,221	5,11	13,17	0,102		
		24B	0,80	0,123	2,51	8,99	0,041	24B	1,15	0,231	6,50	12,02	0,087		
		Média	0,83	0,12	2,42	8,68	0,04	Média	1,19	0,23	5,81	12,59	0,09		
		DP	0,03	0,00	0,09	0,74	0,01	DP	0,06	0,01	0,99	0,81	0,01		
		CV	3%	3%	4%	8%	16%	CV	5%	3%	17%	6%	11%		
	2,1	25B	1,05	0,111	1,77	8,86	0,026	25B	1,58	0,237	5,63	23,26	0,018		
		26B	1,03	0,106	1,68	9,76	0,022	26B	1,61	0,229	6,13	11,93	0,079		
		27B	-	-	-	-	-	27B	1,55	0,213	6,18	15,29	0,019		
		Média	1,04	0,11	1,72	9,31	0,02	Média	1,58	0,23	5,98	16,82	0,04		
		DP	0,01	0,00	0,07	0,63	0,003	DP	0,03	0,01	0,31	5,82	0,03		
		CV	1%	3%	4%	7%	12%	CV	2%	5%	5%	35%	90%		

Fonte: Autor.

#### 4.6 CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

Como já supracitado, as curvas têm um melhor ajuste na forma de potência, tendo o seguinte formato:  $RCS$ ;  $RTCD$ ;  $RTF$  e  $MR = C (\eta/C_{\%})^{-X}$ . Para se obter uma razão igual a uma constante entre os ensaios, que leve em consideração não apenas a resistência e rigidez, mas também as propriedades relacionadas a

compactação e cimentação, deve-se ajustar potencialmente as curvas a uma única potência X.

Perceberam-se valores muito próximos para as resistências e os módulos independentemente da matriz pétreia utilizada. Sendo assim, utilizou-se a média desses valores para calcular um novo valor de X para os ensaios de RCS, RTF e RTCD e outro para os módulos. Após essa etapa, as equações foram recalculadas fazendo com que o somatório dos mínimos quadrados de todas as curvas fosse mínimo. A Tabela 17 ilustra as potências X encontradas para os ensaios com 28 dias de cura, assim como o novo valor ajustado.

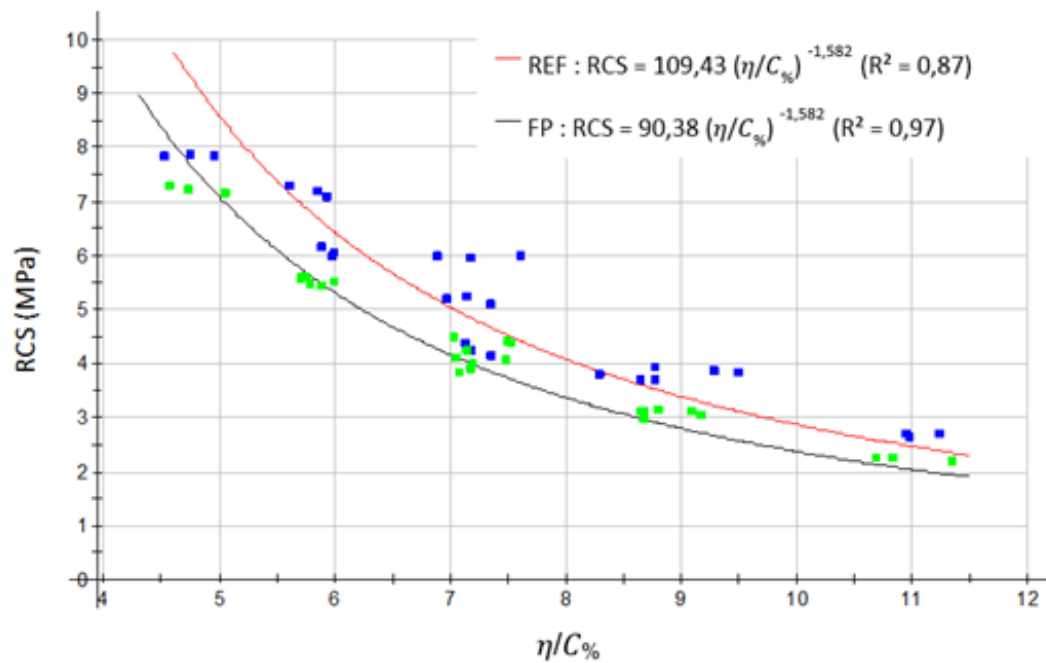
Tabela 17 – Potências X de cada ensaio e potência X ajustada

<b>Ensaio</b>	<b>FP: Potência X</b>	<b>REF: Potência X</b>	<b>Potência X ajustada</b>
RCS	1,393	1,274	1,582
RTF	1,303	1,469	
RTCD	2,101	1,949	
MR 5Hz	1,009	0,906	0,951
MR 10Hz	1,031	0,858	
MR 25Hz	1,061	0,838	

Fonte: Autor.

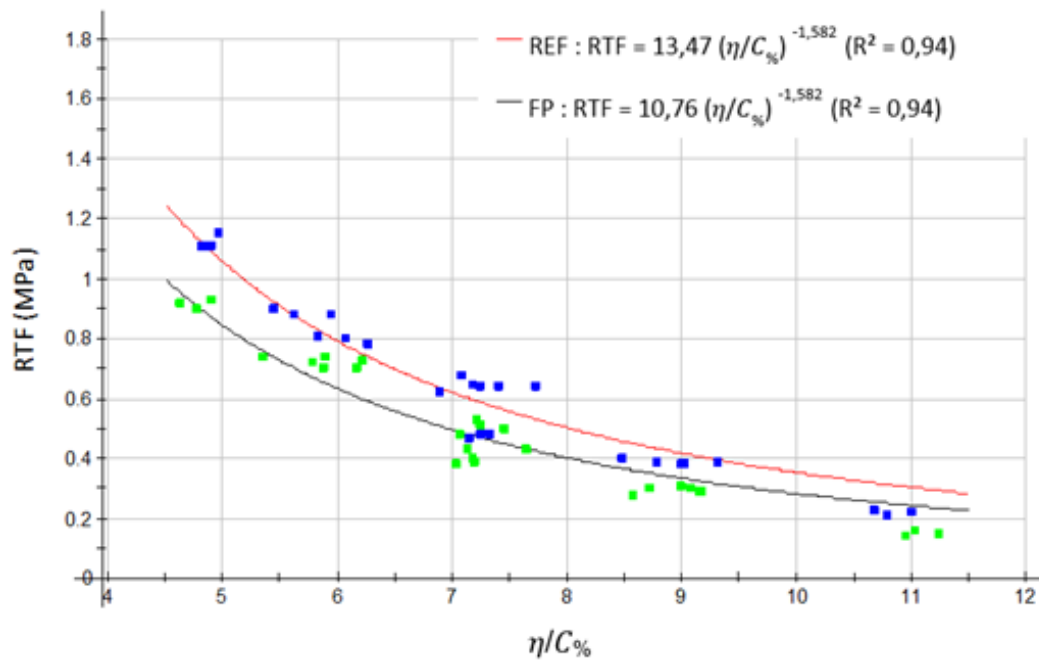
As Figuras 68 a 73 apresentam as curvas de ajuste da variação dos ensaios em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento elevado na potência 1,582 (ensaios de resistência) e 0,951 (ensaios de rigidez). Cada curva representa uma matriz pétreia diferente, estabilizada com material fresado ou agregado virgem, composta por diversas massas específicas e teores de cimento. Todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ( $\omega=8\%$ ).

Figura 68 – Variação da RCS *versus*  $\eta/C_{\%}$  compatibilizada



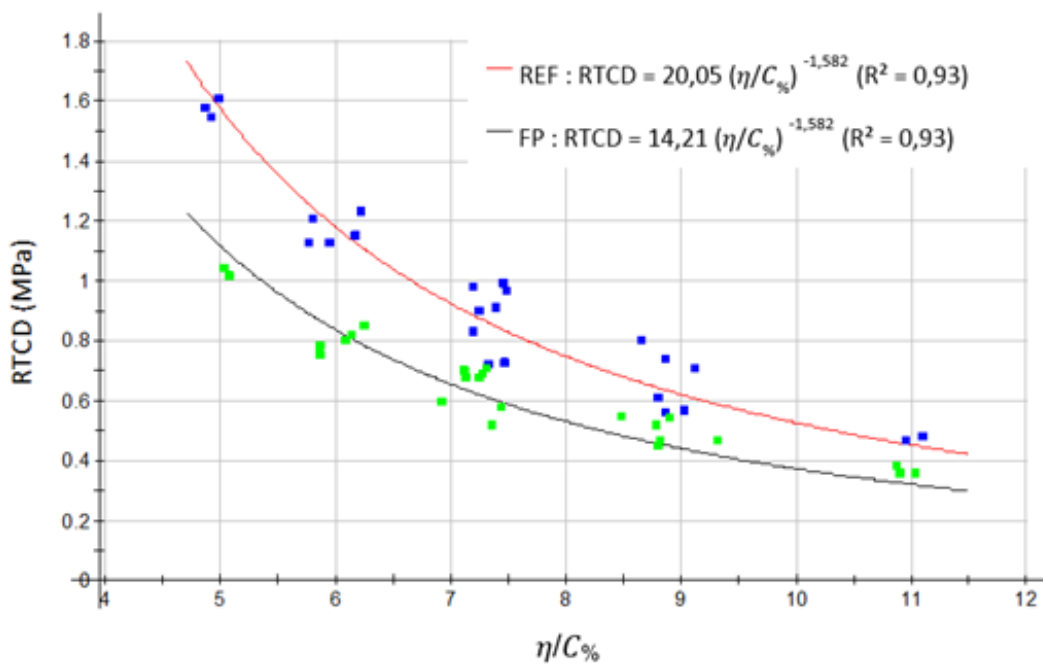
Fonte: Autor.

Figura 69 – Variação da RTF *versus*  $\eta/C_{\%}$  compatibilizada



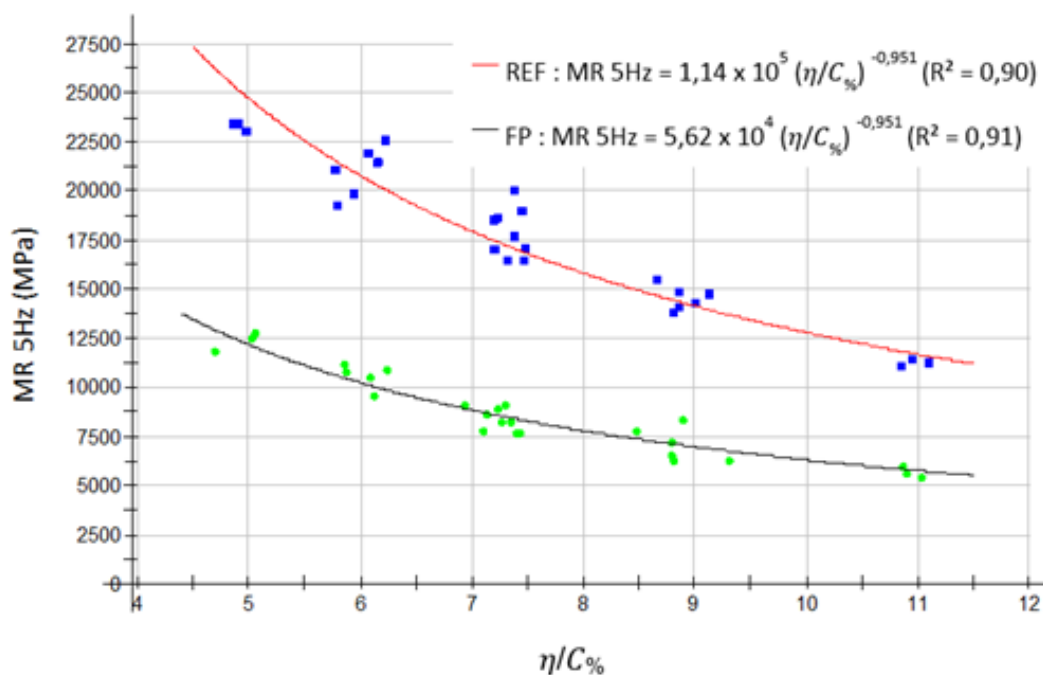
Fonte: Autor.

Figura 70 – Variação da RTCD versus  $\eta/C_{90}$  compatibilizada



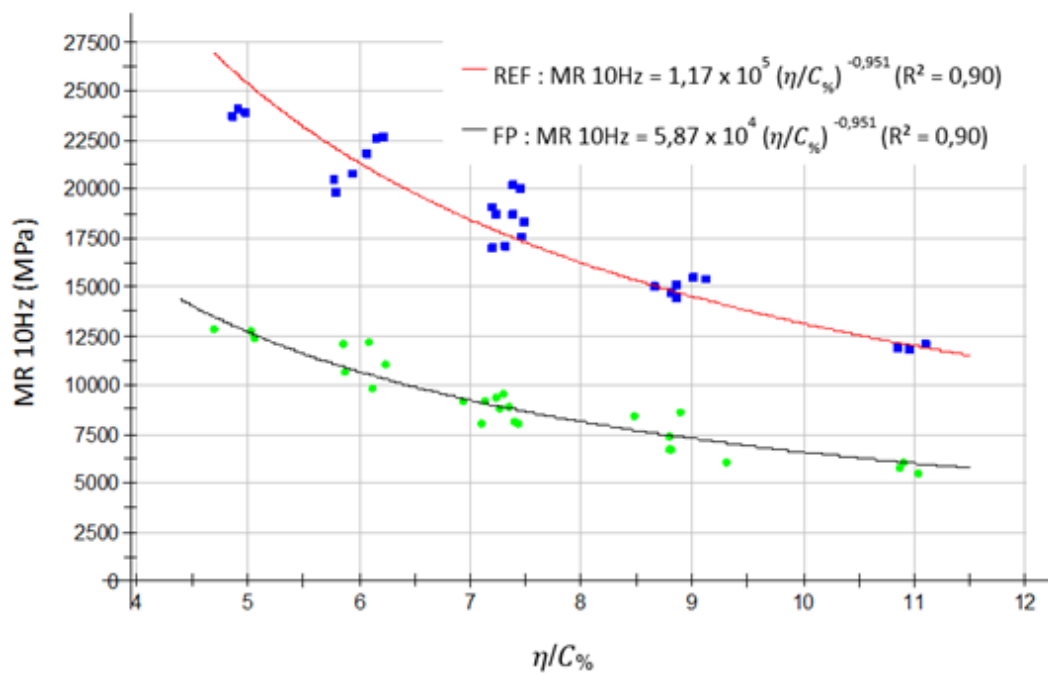
Fonte: Autor.

Figura 71 – Variação da MR 5Hz versus  $\eta/C_{90}$  compatibilizada



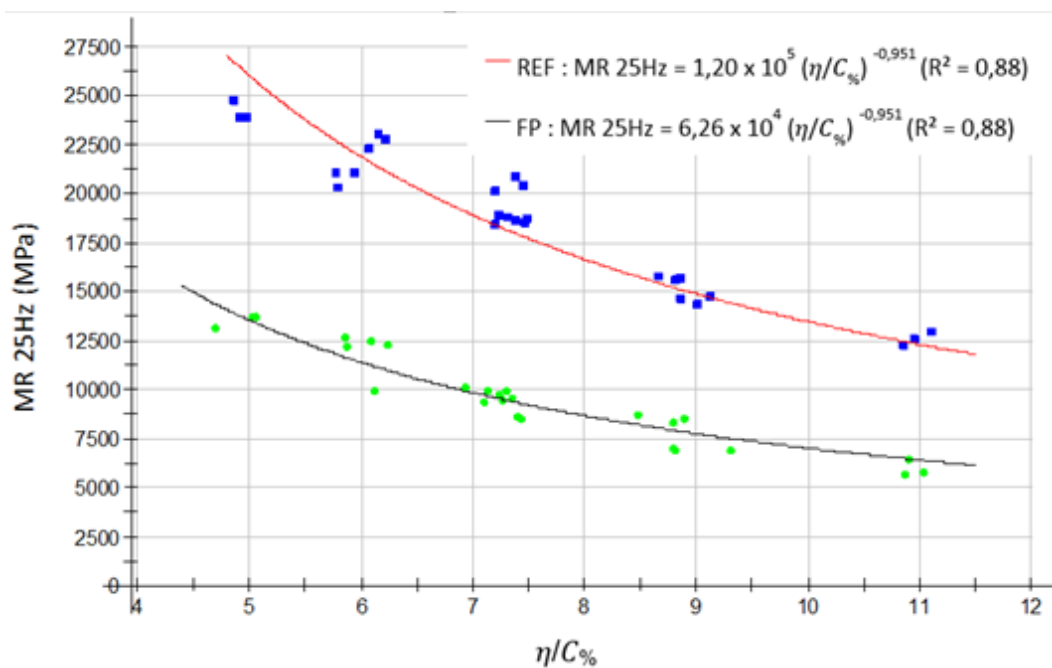
Fonte: Autor.

Figura 72 – Variação da MR 10Hz versus  $\eta/C_{\%}$  compatibilizada



Fonte: Autor.

Figura 73 – Variação da MR 25Hz versus  $\eta/C_{\%}$  compatibilizada

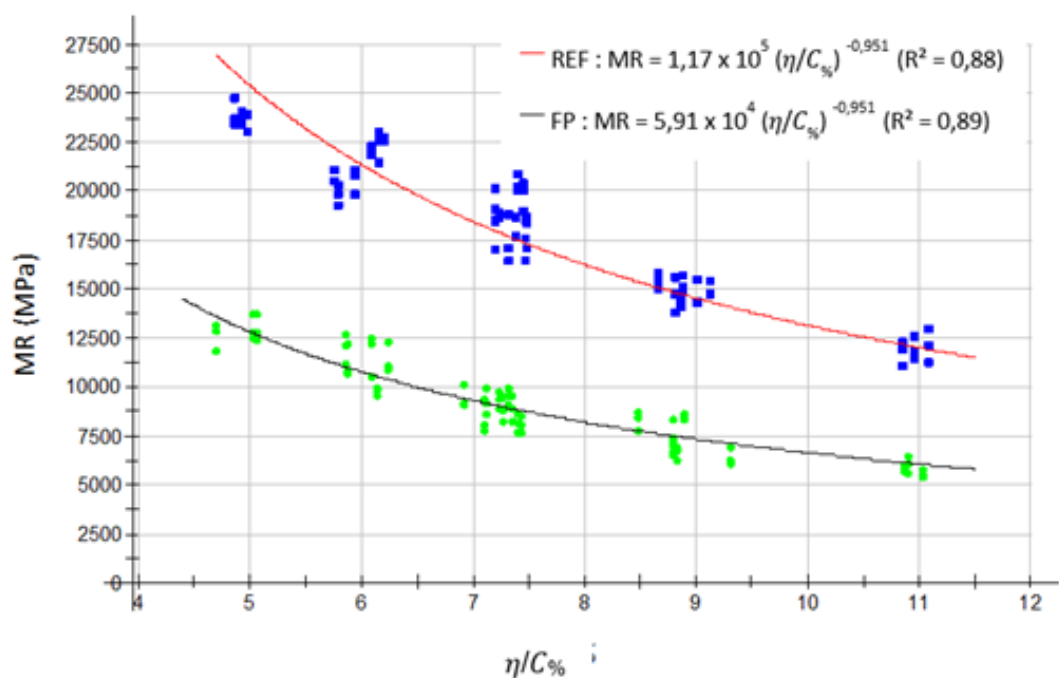


Fonte: Autor.



Pode-se observar uma boa correlação entre a  $\eta/C_{\%}$  compatibilizada com a resistência e rigidez dos materiais. Percebe-se também que a variação da frequência utilizada na realização dos ensaios de módulo não afeta consideravelmente o resultado do ensaio. Sendo assim, para realizar as correlações entre os ensaios de resistência e rigidez, as equações obtidas com as três frequências (5Hz, 10Hz e 25Hz) foram compatibilizadas para um único modelo, referente a matriz pétreo utilizada (apresentada da Figura 74).

Figura 74 – Variação do módulo de resiliência *versus*  $\eta/C_{\%}$  compatibilizada



Fonte: Autor.

De acordo com várias pesquisas já apresentadas neste trabalho, têm-se constatado que as relações entre diferentes resistências ou entre resistência e rigidez estão diretamente controladas, de certa forma, pela relação  $\eta/C_{\%}$ . Comparando-se os modelos obtidos com os ensaios de RCS, RTF e RTCD, percebe-se uma relação direta com  $[C (\eta/C_{\%})^{-1,582}]$ , tendo apenas o escalar C diferente. Portanto, relações únicas podem ser obtidas relacionando esses ensaios.

Nas Equações 12 e 13 são apresentadas as relações  $RTCD/RCS = \xi_{FP}$  e  $RTCD/RCS = \xi_{REF}$ . Já nas Equações 14 e 15 são apresentadas as relações

$RTF/RCS = \delta_{FP}$  e  $RTF/RCS = \delta_{REF}$ . Por fim, nas Equações 16 e 17 são apresentadas, respectivamente, a relação  $RTF/RTCD = \zeta_{FP}$  e  $RTF/RTCD = \zeta_{REF}$ . Para facilitar a representação das equações a seguir, utilizou-se o padrão adotado anteriormente, onde FP representa a matriz pétreo de RAP e REF a matriz pétreo de BGTC.

$$\frac{RTCD}{RCS} = \frac{14,21 (\eta/C\%)^{-1,582}}{90,38 (\eta/C\%)^{-1,582}} = \xi_{FP} = 0,16 \quad (R^2 = 0,94) \quad (12)$$

$$\frac{RTCD}{RCS} = \frac{20,05 (\eta/C\%)^{-1,582}}{109,43 (\eta/C\%)^{-1,582}} = \xi_{REF} = 0,18 \quad (R^2 = 0,90) \quad (13)$$

$$\frac{RTF}{RCS} = \frac{10,76 (\eta/C\%)^{-1,582}}{90,38 (\eta/C\%)^{-1,582}} = \delta_{FP} = 0,12 \quad (R^2 = 0,95) \quad (14)$$

$$\frac{RTF}{RCS} = \frac{13,47 (\eta/C\%)^{-1,582}}{109,43 (\eta/C\%)^{-1,582}} = \delta_{REF} = 0,12 \quad (R^2 = 0,94) \quad (15)$$

$$\frac{RTF}{RTCD} = \frac{10,76 (\eta/C\%)^{-1,582}}{14,21 (\eta/C\%)^{-1,582}} = \zeta_{FP} = 0,76 \quad (R^2 = 0,95) \quad (16)$$

$$\frac{RTF}{RTCD} = \frac{13,47 (\eta/C\%)^{-1,582}}{20,05 (\eta/C\%)^{-1,582}} = \zeta_{REF} = 0,67 \quad (R^2 = 0,96) \quad (17)$$

Essas equações demonstram relações únicas entre os ensaios de resistência avaliados, sendo que essas são independentes da relação vazios/cimento. Vários autores que vêm estudando essa relação verificaram essa mesma característica e relatam valores muito próximos. Pasche (2016), Fedrigo (2015) e Trichês *et al.* (2013) estudando misturas de material fresado estabilizado com pó de pedra obtiveram, respectivamente, as seguintes relações para RTCD/RCS: 0,17; 0,18; 0,20. Neste estudo uma mistura idêntica foi realizada, obtendo-se  $\xi_{FP} = 0,16$ ; já a mistura de BGTC seguiu o mesmo padrão, tendo como valor  $\xi_{REF} = 0,18$ . Percebe-se assim, que a relação RTCD/RCS vem apresentando a mesma tendência, o que pode abrir a possibilidade de uma futura generalização dos resultados dessa relação. Porém, ainda há grande necessidade de se estudar outros materiais,

misturas e tempos de cura, principalmente para a relação RTF/RTCD que demonstraram uma diferença razoável dependendo do agregado utilizado.

Outras relações de suma importância no estudo de materiais cimentados para pavimentação são as que abordam a resistência frente sua rigidez. No item 4.4 já se relatou uma das principais importâncias de se conhecer ambas as propriedades. Com o auxílio das equações obtidas na Figura 74, pôde-se calcular as relações entre RCS/MR (Equação 18 e 19), RTCD/MR (Equação 20 e 21) e RTF/MR (Equação 22 e 23).

$$\frac{RCS_{FP}}{MR_{FP}} = \frac{90,38 (\eta/C\%)^{-1,582}}{5,91 \times 10^4 (\eta/C\%)^{-0,951}} \leftrightarrow RCS_{FP} = MR_{FP} * 1,53 \times 10^{-3} \left(\frac{\eta}{C\%}\right)^{-0,631} \quad (R^2 = 0,91) \quad (18)$$

$$\frac{RCS_{REF}}{MR_{REF}} = \frac{109,43 (\eta/C\%)^{-1,582}}{1,17 \times 10^5 (\eta/C\%)^{-0,951}} \leftrightarrow RCS_{REF} = MR_{REF} * 9,35 \times 10^{-4} \left(\frac{\eta}{C\%}\right)^{-0,631} \quad (R^2 = 0,89) \quad (19)$$

$$\frac{RTCD_{FP}}{MR_{FP}} = \frac{14,21 (\eta/C\%)^{-1,582}}{5,91 \times 10^4 (\eta/C\%)^{-0,951}} \leftrightarrow RTCD_{FP} = MR_{FP} * 2,4 \times 10^{-4} \left(\frac{\eta}{C\%}\right)^{-0,631} \quad (R^2 = 0,94) \quad (20)$$

$$\frac{RTCD_{REF}}{MR_{REF}} = \frac{20,05 (\eta/C\%)^{-1,582}}{1,17 \times 10^5 (\eta/C\%)^{-0,951}} \leftrightarrow RTCD_{REF} = MR_{REF} * 1,71 \times 10^{-4} \left(\frac{\eta}{C\%}\right)^{-0,631} \quad (R^2 = 0,91) \quad (21)$$

$$\frac{RTF_{FP}}{MR_{FP}} = \frac{10,76 (\eta/C\%)^{-1,582}}{5,91 \times 10^4 (\eta/C\%)^{-0,951}} \leftrightarrow RTF_{FP} = MR_{FP} * 1,82 \times 10^{-4} \left(\frac{\eta}{C\%}\right)^{-0,631} \quad (R^2 = 0,91) \quad (22)$$

$$\frac{RTF_{REF}}{MR_{REF}} = \frac{13,47 (\eta/C\%)^{-1,582}}{1,17 \times 10^5 (\eta/C\%)^{-0,951}} \leftrightarrow RTF_{REF} = MR_{REF} * 1,15 \times 10^{-4} \left(\frac{\eta}{C\%}\right)^{-0,631} \quad (R^2 = 0,91) \quad (23)$$

Ao contrário do que se observou com as relações entre as resistências, a compatibilização dos resultados com sua rigidez está diretamente relacionada com a relação  $\eta/C\%$ . Isso demonstra o motivo de muitas vezes se tornar difícil estimar o módulo de resiliência de camadas cimentadas. A importância desses modelos surge principalmente para a verificação do MR, eventualmente definidos em projeto, sem necessidade de realizar o respectivo ensaio, principalmente por necessitar de equipamentos que nem sempre se encontram disponíveis no laboratório de controle

da obra. Vale ressaltar que pouquíssimos dados foram retirados para a determinação dos coeficientes das equações  $C (\eta/C_{\%})^{-1,582}$  e  $C (\eta/C_{\%})^{-0,951}$  por serem considerados espúrios. Entretanto, apesar de todos os modelos terem obtido excelente ajuste, deve-se atentar para utilização dos mesmos para misturas semelhantes às estudadas nesta pesquisa.

#### 4.7 MATERIAL FRESADO *VERSUS* AGREGADO NATURAL

Um dos principais questionamentos que surge ao se utilizar o material fresado é o quão bom esse material é comparado a um agregado natural. Desse modo, esta pesquisa partiu da premissa de comparar todos os resultados obtidos da matriz pétreia de 70% material fresado e 30% pó de pedra com uma mistura de BGTC confeccionada para obter a mesma curva granulométrica.

Os resultados apresentados frente a todas as análises demonstram que ambos os materiais apresentam o mesmo comportamento, tendo um aumento linear com a adição de cimento, um acréscimo exponencial com a redução da porosidade, uma relação direta de sua resistência e rigidez com a relação  $\eta/C_{\%}$  e excelentes ajustes frente as suas correlações. Como já explicado no capítulo 4.1, a diferença apresentada nos resultados finais já era esperada, essa se deve principalmente pela quantidade de pasta de cimento presente nas misturas e a presença de CAP envolvido nos agregados de RAP.

Contudo, sabendo-se que as camadas cimentadas em pavimentos suportam às cargas originadas pelo tráfego rodoviário como placas de flexão no início de sua utilização e que as misturas com material fresado apresentaram em média 76,9% das resistências e 50,2% dos módulos obtidos com as misturas de BGTC. Pode-se concluir, levando-se em conta também às conclusões apresentadas nos trabalhos de Ricci e Balbo (2009) e Balbo e Albuquerque (2013), nos quais se entende que quanto maior for a rigidez de uma base cimentada maior será a tensão de tração na flexão atuante sobre a mesma, que a perda de rigidez e a preservação simultânea de resistência é algo tido como benéfico ou vantajoso, em uma primeira análise. Assim sendo, conclui-se que o material fresado, respeitando suas características próprias e limitações, tem todo o potencial para ser utilizado como agregado para a concepção de camadas de suporte para pavimentação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo final serão apresentadas as conclusões obtidas no decorrer desta pesquisa, por meio dos resultados obtidos em laboratório, tal como sua análise minuciosa. Além disso, visando o aproveitamento progressivo do material fresado, são realizadas sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES

Devido à imprescindibilidade de preservação dos recursos naturais disponíveis no planeta, a preocupação com a questão ambiental ganha enfoque, também, na produção de projetos de engenharia. Desse modo, o material fresado originado por grande parte das intervenções nas obras rodoviárias, tendo um correto estudo e aplicação, pode vir a consolidar sua capacidade técnica e econômica.

O estudo da utilização de RAP nas misturas cimentadas para confecção de camadas de base para pavimentação vem sendo recorrente em pesquisas desenvolvidas no Brasil e no mundo. O presente estudo contribui para o avanço do conhecimento da utilização de agregados reciclados frente à utilização de materiais naturais. Além disso, tendo como objetivo principal a avaliação das principais propriedades que influenciam as camadas cimentadas, a pesquisa visa contribuir com dados e avaliações sob o ponto de vista do comportamento da resistência e rigidez frente misturas com diferentes agregados, densidades, cimentações e principalmente relações porosidade/teor volumétrico de cimento.

#### 5.1.1 Quanto à influência da quantidade de cimento

Verificou-se que a adição de cimento, mesmo em pequenas proporções, tem um grande efeito sobre a resistência e rigidez do material, independentemente da massa específica aparente seca utilizada (1,9; 2,0 e 2,1 g/cm<sup>3</sup>). Nos três teores estudados (4, 5 e 6%), tanto para a matriz pétreia de RAP como a de BGTC, verificou-se um aumento linear em suas resistências e módulos com o aumento da quantidade de cimento. Outro aspecto observado é que para um mesmo teor de cimento, aumentando-se a energia de compactação, aumenta-se a resistência e a

rigidez. Logo, o fato de adicionar cimento não é garantia de bons resultados se o material não for compactado a ponto de promover um arranjo entre os grãos que assegure a redução de vazios da mistura.

Percebeu-se uma diferença entre os valores finais dos resultados decorrentes da diferença entre os agregados utilizados. Isso se deve principalmente pela quantidade de pasta de cimento que é incapaz de envolver totalmente os grãos e pela presença de CAP envolvendo os agregados do material fresado. Logo, as ligações cimentantes acabam fragilizadas e, conseqüentemente, as misturas com materiais naturais apresentam resultados superiores.

Por fim, as misturas de RAP demonstram apresentar propriedades viscoelásticas. Tal fato justifica a variação de rigidez decorrente da variação de aplicação de carga para as misturas com fresado, logo, deve-se realizar os ensaios de módulo de resiliência em diferentes frequências, já para misturas como a BGTC, a rigidez tende a se manter constante com os diferentes tempos de aplicação de carga, não justificando a realização do ensaio em diferentes frequências.

### **5.1.2 Quanto ao efeito da porosidade**

Independentemente da quantidade de cimento adicionada na mistura, a redução de porosidade afetou consideravelmente a resistência à compressão e tração, ao ponto que para os módulos, mesmo ensaiados em diferentes frequências, o aumento foi moderado. Os valores médios de porosidade para cada massa específica foram: 26,8% para 1,90 g/cm<sup>3</sup>; 23,21% para 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 19,58% para 2,1 g/cm<sup>3</sup>. As análises demonstraram que para os ensaios de resistência (RCS, RTF e RTCD) houve um aumento exponencial com a redução da porosidade, já os ensaios de módulo apresentaram um aumento praticamente linear.

Entende-se que o efeito do ganho de resistência e rigidez com a redução na porosidade das misturas estudadas, é predominantemente causado pela cimentação mais efetiva, em função da redução da porosidade (aumento da densidade) do material e conseqüentemente maior número de contatos entre partículas existentes. Além disso, a maior eficácia na distribuição das tensões no interior do corpo de prova, bem como a maior capacidade de gerar atrito devido à redução de porosidade contribuem para o ganho de resistência do material.

### 5.1.3 Relação porosidade/teor volumétrico de cimento

Verificou-se que independentemente da composição granulométrica utilizada, existem correlações únicas entre a resistência e rigidez do ensaio realizado com sua relação  $\eta/C_{\%}$ . Podendo assim, avaliar as propriedades das misturas com um excelente grau de precisão.

Uma das principais conclusões que se obteve analisando os resultados frente essa relação, foi que existem pontos nos quais um mesmo valor de  $\eta/C_{\%}$  representa valores de resistência e rigidez semelhantes. Isso pode ser observado, por exemplo, quando a relação se aproxima de 7, na qual se dimensionando uma camada cimentada com 4% de cimento utilizando energia modificada, 5% de cimento com energia intermediária e 6% de cimento com energia normal se obtêm praticamente as mesmas propriedades mecânicas para a matriz pétreia adotada. Desta forma, o projetista pode, empregando a relação  $\eta/C_{\%}$ , adotar adequadamente a energia de compactação e o teor de cimento a ser utilizado visando uma mistura que cumpra com as especificações ao menor custo possível.

Além disso, sua utilização tem extrema importância no controle da execução das camadas cimentadas. Tendo em vista que, constatada uma compactação inferior à estabelecida, poderá o executor estimar com segurança a perda de resistência e rigidez da camada e conseqüentemente poderão ser adotadas medidas reparadoras.

### 5.1.4 Relação MR/RTCD

Essa relação representa um importante meio para avaliar a durabilidade da camada cimentada, visto que materiais muito rígidos acabam por concentrar elevados esforços em seu interior, necessitando de uma elevada resistência à tração para suportar esses efeitos. Sendo assim, percebeu-se que as misturas que apresentaram as menores relações MR/RTCD foram as que continham a matriz pétreia formada por 70% material fresado e 30% pó de pedra.

Essa análise pode evidenciar que do ponto de vista da rigidez *versus* resistência à tração, uma das possíveis análises a se fazer para verificar o

comportamento a fadiga de materiais cimentados, pode-se dizer que misturas com material fresado apresentam uma maior capacidade de absorção das energias de deformação. Sendo assim, sabendo-se que quanto maior for a rigidez de uma base cimentada maior será a tensão de tração na flexão atuante sobre a mesma, a perda de rigidez e a preservação simultânea de resistência é algo tido como benéfico ou vantajoso, em uma primeira análise.

### 5.1.5 Correlações entre os resultados

As curvas foram ajustadas na forma de potência, tendo o formato  $RCS$ ;  $RTCD$ ;  $RTF$  e  $MR = C (\eta/C_{\%})^{-X}$ . Foi compatibilizada uma potência  $X$  para os ensaios de resistência (1,582) e outra para os de rigidez (0,951) apresentando um excelente grau de ajuste. Também, apurou-se que a variação de frequência no ensaio de MR não afetou consideravelmente o resultado do ensaio, assim as três frequências foram compatibilizadas em uma única equação para cada matriz pétreia.

As relações entre os ensaios de resistência ( $RTCD/RCS$ ,  $RTF/RCS$  e  $RTF/RTCD$ ) demonstraram que existem relações únicas, sendo que essas são independentes da relação  $\eta/C_{\%}$ . Ressalta-se principalmente as relações  $RTCD/RCS$  que obtiveram valores de 0,16 (mistura FP) e 0,18 (mistura BGTC), sendo esses valores similares aos verificados na bibliografia. Logo, têm-se a possibilidade de uma futura generalização dos resultados dessa relação.

Ao contrário do que se observou com as relações entre as resistências, a compatibilização dos resultados com sua rigidez está diretamente relacionada com a relação  $\eta/C_{\%}$ . Isso demonstra o motivo da maior dificuldade de estimar o MR de camadas cimentadas. Contudo, a partir os modelos apresentados, respeitando-se as características das misturas utilizadas, pôde-se estimar com maior confiabilidade os módulos eventualmente definidos em projeto, sem a necessidade de realizar o ensaio que muitas vezes não têm os equipamentos necessários no laboratório do canteiro de obras.



### 5.1.6 Material fresado *versus* agregado natural

Os resultados apresentados frente a todas as análises demonstraram que ambos os materiais apresentam o mesmo comportamento. Os dois apresentaram um aumento linear com a adição de cimento, um acréscimo exponencial com a redução da porosidade, uma relação direta de sua resistência e rigidez com a relação  $\eta/C\%$  e excelentes ajustes frente as suas correlações.

Verificou-se que o mesmo ligante asfáltico presente nos agregados de RAP, que prejudica o acréscimo de resistência e rigidez, parece transformar a mistura em um material com propriedades viscoelásticas. Esse fato talvez justifique a diferença do comportamento das misturas quando analisadas sua rigidez.

Posto isso, ao realizar uma análise geral dos resultados, pôde-se concluir que o material fresado, respeitando suas características próprias e limitações, tem todo o potencial para ser utilizado como agregado para a concepção de camadas de suporte para pavimentação. Ademais, a relação  $\eta/C\%$  demonstrou estar estritamente relacionada com as propriedades que comandam o comportamento de misturas cimentadas, tendo em sua utilização um excelente critério racional para futuras metodologias de dosagem e projeto.

Por fim, ressalta-se a necessidade de realização de ensaios de fadiga sobre as amostras, principalmente para trazer novos conhecimentos sobre a durabilidade dos materiais estudados sob carregamento repetido. Visto que, como relatado por Ricci e Balbo (2009), com uma maior porosidade e com agregados mais frágeis na composição das misturas há possibilidades de um comportamento à fadiga menos satisfatório, que dependeria não apenas das ligações na interface pasta/agregado mas também da resistência do próprio agregado. Assim como, recomenda-se enfaticamente estudos de campo que possam expor o desempenho à fissuração dos materiais estudados com diferentes relações de  $\eta/C\%$  bem como os possíveis danos em termos de fissuração por reflexão para camadas de misturas asfálticas, além de avaliar a durabilidade de pavimentos frente a aspectos estruturais e funcionais que utilizaram materiais reciclados.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a elaboração desta dissertação de mestrado foram verificadas algumas possibilidades de continuidade da pesquisa:

- a) realização de ensaios de fadiga principalmente para trazer novos conhecimentos sobre a durabilidade dos materiais estudados sob carregamento repetido;
- b) estudos de campo que possam expor o desempenho à fissuração dos materiais estudados com diferentes relações de  $\eta/C_{\%}$ ;
- c) estabilização do RAP em outras proporções, visando o máximo aproveitamento desse material;
- d) analisar a estabilização química com outros aglomerantes (cimento Portland CP – IV e CP – II e cal hidratada dolomítica CH-II);
- e) analisar a estabilização química com diferentes adições minerais (sílica da casca de arroz e cinza volante);
- f) realizar ensaios triaxiais, a fim de obter o MR da mistura estabilizada granulometricamente e do material fresado puro;
- g) levantamento dos custos da utilização de RAP frente a agregado natural;
- h) verificar a relação  $\eta/C_{\%}$  para diferentes tempos de cura (91, 360 dias) e temperaturas de cura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANHA, A. L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 125p. 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, 2016. 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, 2009. 15 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578: Cimento Portland composto – Especificação**. Rio de Janeiro, 1997, 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, 1991, 3 p.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 15619: Misturas asfálticas – Determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas**. Rio de Janeiro, 2008. 8 p.

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.; ALBUQUERQUE, M. C. F. **Análise preliminar de parâmetros de fratura de concretos compactados com agregados de construção e de demolição para bases de pavimentos.** Transportes, Rio de Janeiro, v. 21, p. 44-50, 2013.
- 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.
- CERATTI, J. A. P. **Estudo do comportamento à fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos.** 1991. 314p. 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.
- CERVO, T. C. **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação.** 2004. 242p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CLOUGH, G. W.; SITAR, N.; BACHUS, R. C.; RAD, N. S. **Cemented Sands Under Static Loading.** Journal of Geotechnical Engineering Division, New York: ASCE, v.107, n.GT6, p.799-817, 1981.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. Pesquisa CNT de rodovias 2017: **relatório gerencial.** Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2017.
- 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.; LOPES 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.; LOPES 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.

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.

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 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 180/1994:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, 1994, 11 p.

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

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

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

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

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

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

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

\_\_\_\_\_. DNER-ME 180/1994: **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples**. Rio de Janeiro, 1994, 11 p.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 195/1997: **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 141/2010: **Pavimentação asfáltica – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010, 9 p.

\_\_\_\_\_. DNIT-ES 167/2013: **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 134/2010: **Pavimentação - Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2005, 11 p.

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

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

\_\_\_\_\_. DNIT-ME 172/2016: **Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2016, 17 p.

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.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente**. 2018. 222 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, 2018.

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. 146 p. 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.

HAAS, R.; HUDSON, W.R.; ZANIEWSKI, J. P. **Modern Pavement Management**, Florida, 1994.

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

HVEEM, F. N. **Pavement deflection and fatigue failures**. IN: Annual Meeting – 1955.

ISMAIL, M. A.; JOER, H. A.; RANDOLPH, M. F.; MERITT, A. **Cementation of Porous Materials Using Calcite**. Géotechnique, London, v.52, n.5, p.313-324, 2002.

INGLES, O G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Australia: Butterworths Pty. Limited, 1972. 366p.

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. **Reciclado de firmes in situ con cemento: 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.

JAPAN ROAD ASSOCIATION. **Technical Guidelines for in-situ recycling of base course**: JRA. 1984.

JASIENSKI, A.; RENS, L. **In situ recycling with cement: The Belgian experience.** In: Seminar on Road Pavement Recycling –Proceedings... Polônia, 2002, 9p.

JI, X.; JIANG, Y; LIU, Y. **Evaluation of the mechanical behaviors of cement-stabilized cold recycled mixtures produced by vertical vibration compaction method.** Materials and Structures, p. 1-14, 2015.

KIM, Richard; Wen e Y Haifang. (2002). **Fracture Energy from Indirect Tension Testing.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 71. 779-793.

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 Erskineand Co., v.55, n.648, p. 903-905, 1960.

LAY, M. G. **Ways of the World – A History of the World’s Roads and of the Vehicles that used them.** Rutgers University Press, EUA, 1992. 401 p.

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.

MOREIRA, J. P. V.; PEREIRA, P.; CORREIA, A. G. **Reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento.** IV Congresso Rodoviário Português – Centro de Congressos do Estoril, 2003. 15 p.

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.; 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. de; 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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 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.

PUTMAN Bradley J., Serji N. AMIRKHANIAN. **Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures**. Resources, Conservation and Recycling, Volume 42, Issue 3,2004, Pages 265-274.

RICCI, G.; BALBO, J. T. **Resistência e elasticidade de concretos compactados com agregados reciclados de construção e de demolição para aplicações em pavimentação**. Transportes, v. 17, n. 2, p. 27–35, 2009.

SACHET, T.; ALBUQUERQUE, M. C. F.; BALBO, J. T.; SANSONE, C.E. **Investigation of Resistance and Fracture Parameters for Compacted Concrete with Incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement**. International\_Journal\_of Pavements, v. 10 p. 83-94, 2011.

SACHET, T.; BALBO, J. T.; BONSEMBIANTE, F. T. **Rendering the loss of strength in dry concretes with addition of milled asphalt through microscopic analysis**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 6 p. 933-954, 2013.

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.

SARA. **South African Engineering Manual**. Ed. 2013. ISBN 978-1-920611-00-2. 102 p.

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. **Utilização de material fresado com adições de cimento Portland e pó de pedra em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2016. 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2016.

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, Engineering Experiment Station. Urbana, Illinois, USA, 1923.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. **Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC-303**. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS e 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.

TRICHÊS, G. *et al.* **Caracterização do comportamento mecânico de misturas recicladas com adição de cimento**. In: 42ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – Anais... Gramado, 2013. 13 p.N 0921-3449.

VIRGILIIS, A. L. C., **Procedimento de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2009.

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 firmes con cemento, 2001, Salamanca, España. Anais... Salamanca: IECA, p. 104-132, 2001.

VOTORANTIM. **Especificações técnicas de produtos.** Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-votoran/obras-especiais/>>. Acesso em: 23 março de 2018.

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 e Sons Inc., ed. 2, 1975. 711p.

## APÊNDICE A – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RCS: MISTURA FP

Cimento (%)	Yd (g/cm³)	Cura (dias)	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Yd medido (g/cm³)	GC (%)	η (%)	C <sub>c</sub> (%)	η/C <sub>c</sub>	RCS (MPa)
4	1,9	7	8,08%	101,23	195,66	1574,83	3250	1,91	100,50%	26,55%	2,45%	10,85	1,84
			8,08%	100,68	195,83	1558,88	3245	1,93	101,37%	25,92%	2,47%	10,50	1,87
			8,25%	100,94	197,38	1579,56	3255	1,90	100,19%	26,78%	2,44%	10,97	1,81
		28	8,22%	101,30	195,12	1572,50	3250	1,91	100,52%	26,54%	2,45%	10,84	2,25
			8,20%	101,26	198,05	1594,96	3255	1,89	99,27%	27,45%	2,42%	11,35	2,18
			8,21%	100,75	197,15	1571,58	3260	1,92	100,90%	26,26%	2,46%	10,69	2,26
	2,0	7	8,16%	101,42	196,44	1586,92	3430	2,00	99,92%	23,13%	2,56%	9,03	2,44
			8,15%	100,71	198,38	1580,33	3430	2,01	100,34%	22,81%	2,57%	8,87	2,59
			8,13%	100,71	198,25	1579,09	3420	2,00	100,15%	22,96%	2,57%	8,94	2,52
		28	8,04%	100,91	198,33	1586,22	3445	2,01	100,51%	22,68%	2,58%	8,80	3,14
			8,00%	100,85	199,54	1593,89	3435	2,00	99,77%	23,25%	2,56%	9,09	3,12
			8,28%	101,17	197,65	1588,83	3425	1,99	99,54%	23,42%	2,55%	9,18	3,05
	2,1	7	8,19%	101,88	194,17	1582,71	3570	2,08	99,28%	19,80%	2,67%	7,41	3,97
			8,27%	101,30	195,78	1577,95	3570	2,09	99,50%	19,62%	2,68%	7,33	4,04
			8,25%	101,16	195,37	1570,16	3575	2,10	100,16%	19,10%	2,70%	7,08	3,94
		28	8,15%	100,52	198,38	1574,17	3585	2,11	100,28%	19,00%	2,70%	7,04	4,47
			8,23%	101,64	197,40	1601,52	3605	2,08	99,04%	20,00%	2,67%	7,50	4,41
			8,24%	101,37	197,20	1591,41	3580	2,08	98,96%	20,06%	2,66%	7,53	4,39
5	1,9	7	7,74%	100,76	196,52	1566,84	3245	1,92	101,17%	26,19%	3,08%	8,50	2,50
			7,97%	100,77	196,94	1570,66	3245	1,91	100,71%	26,52%	3,07%	8,65	2,49
			8,04%	100,82	198,37	1583,60	3250	1,90	99,98%	27,06%	3,04%	8,89	2,46
		28	7,83%	100,99	196,50	1573,94	3245	1,91	100,63%	26,59%	3,06%	8,68	3,12
			7,77%	100,84	197,25	1575,18	3245	1,91	100,61%	26,60%	3,06%	8,68	2,97
			8,10%	101,09	195,72	1570,93	3250	1,91	100,73%	26,51%	3,07%	8,64	3,10
	2	7	8,35%	100,81	198,69	1585,84	3425	1,99	99,67%	23,46%	3,19%	7,34	3,13
			8,29%	101,13	197,22	1584,22	3425	2,00	99,82%	23,34%	3,20%	7,30	3,13
			7,95%	101,13	198,60	1595,23	3430	1,99	99,59%	23,52%	3,19%	7,37	3,14
		28	8,18%	101,25	198,42	1597,41	3430	1,98	99,24%	23,78%	3,18%	7,48	4,08
			8,17%	100,46	199,07	1577,86	3435	2,01	100,62%	22,72%	3,23%	7,05	4,11
			8,06%	100,62	198,69	1579,98	3425	2,01	100,30%	22,97%	3,21%	7,15	4,23
	2,1	7	8,26%	100,69	198,32	1579,23	3570	2,09	99,44%	19,82%	3,35%	5,92	4,70
			8,19%	100,63	198,57	1579,20	3575	2,09	99,64%	19,65%	3,35%	5,86	4,78
			8,28%	100,37	198,75	1572,64	3580	2,10	100,11%	19,27%	3,37%	5,72	4,77
		28	8,10%	101,17	196,67	1580,93	3585	2,10	99,89%	19,45%	3,36%	5,79	5,48
			8,14%	100,87	197,72	1579,95	3595	2,10	100,19%	19,21%	3,37%	5,70	5,60
			8,12%	101,61	195,99	1589,32	3580	2,08	99,20%	20,01%	3,34%	5,99	5,50
6	1,9	7	8,10%	100,75	195,67	1559,85	3245	1,92	101,28%	26,24%	3,70%	7,09	2,87
			8,20%	100,52	196,00	1555,39	3245	1,93	101,48%	26,09%	3,71%	7,04	2,78
			8,17%	100,52	197,49	1567,08	3245	1,91	100,75%	26,62%	3,68%	7,23	2,85
		28	8,19%	100,70	196,25	1562,98	3255	1,92	101,31%	26,21%	3,70%	7,08	3,83
			8,32%	100,96	195,38	1564,10	3250	1,92	100,96%	26,47%	3,69%	7,18	3,91
			8,25%	100,19	199,33	1571,57	3260	1,92	100,85%	26,55%	3,69%	7,20	3,99
	2	7	8,35%	100,68	197,39	1571,48	3415	2,01	100,28%	23,12%	3,86%	5,99	4,04
			8,47%	101,25	196,75	1583,97	3425	1,99	99,67%	23,59%	3,83%	6,15	3,91
			8,28%	100,88	195,79	1565,00	3410	2,01	100,62%	22,86%	3,87%	5,91	3,95
		28	8,16%	100,53	196,48	1559,63	3420	2,03	101,37%	22,29%	3,90%	5,72	5,62
			8,49%	100,55	196,33	1559,06	3425	2,02	101,25%	22,38%	3,89%	5,75	5,62
			8,37%	101,13	195,32	1568,73	3425	2,01	100,74%	22,77%	3,87%	5,88	5,46
	2,1	7	8,44%	100,93	194,86	1558,95	3570	2,11	100,56%	19,05%	4,06%	4,69	5,39
			8,42%	101,23	196,92	1584,84	3565	2,07	98,80%	20,47%	3,99%	5,13	5,26
			8,29%	100,93	195,95	1567,83	3575	2,11	100,27%	19,28%	4,05%	4,76	5,45
		28	8,41%	100,62	197,25	1568,45	3585	2,11	100,40%	19,19%	4,05%	4,73	7,23
			8,42%	100,96	194,74	1558,82	3585	2,12	101,01%	18,69%	4,08%	4,58	7,30
			8,20%	101,52	196,64	1591,56	3585	2,08	99,13%	20,21%	4,00%	5,05	7,17

## APÊNDICE B – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RCS: MISTURA REF

Cimento (%)	Yd (g/cm³)	Cura (dias)	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Yd medido (g/cm³)	GC (%)	η (%)	C <sub>v</sub> (%)	η/C <sub>v</sub>	RCS (MPa)
4	1,9	7	7,75%	100,59	197,61	1570,48	3250	1,92	101,08%	26,25%	2,46%	10,66	2,31
			7,95%	100,83	196,50	1568,91	3249	1,92	100,96%	26,33%	2,46%	10,71	2,40
			7,78%	100,71	199,09	1585,78	3248	1,90	100,01%	27,03%	2,44%	11,09	2,27
		28	7,87%	100,74	198,15	1579,34	3247	1,91	100,30%	26,81%	2,44%	10,97	2,65
			7,99%	101,04	197,48	1583,26	3238	1,89	99,68%	27,26%	2,43%	11,23	2,70
			7,83%	100,56	198,40	1575,82	3241	1,91	100,38%	26,76%	2,45%	10,94	2,72
	2,0	7	7,75%	100,67	199,07	1584,39	3418	2,00	100,09%	23,12%	2,57%	9,01	2,98
			7,75%	101,11	199,00	1597,68	3425	1,99	99,47%	23,59%	2,55%	9,25	2,93
			7,83%	101,36	198,73	1603,60	3414	1,97	98,72%	24,18%	2,53%	9,55	2,93
		28	7,88%	100,81	199,87	1595,34	3422	1,99	99,40%	23,65%	2,55%	9,28	3,86
			7,99%	100,59	197,75	1571,38	3418	2,01	100,72%	22,64%	2,58%	8,77	3,95
			7,94%	101,60	197,87	1604,18	3423	1,98	98,84%	24,08%	2,53%	9,50	3,83
	2,1	7	7,91%	101,14	197,41	1585,83	3594	2,10	100,01%	19,34%	2,69%	7,18	4,46
			7,76%	101,02	198,30	1589,23	3594	2,10	99,94%	19,40%	2,69%	7,21	4,36
			7,76%	101,38	199,47	1610,20	3597	2,07	98,70%	20,40%	2,66%	7,68	4,29
		28	7,97%	100,75	197,90	1577,66	3579	2,10	100,05%	19,31%	2,69%	7,17	5,97
			7,85%	101,04	196,27	1573,76	3593	2,12	100,80%	18,71%	2,71%	6,89	5,99
			8,07%	101,02	198,90	1594,25	3578	2,08	98,88%	20,25%	2,66%	7,61	6,01
5	1,9	7	8,18%	100,59	198,76	1579,51	3279	1,92	101,00%	26,43%	3,08%	8,59	3,06
			8,25%	100,51	197,83	1569,52	3246	1,91	100,55%	26,75%	3,06%	8,74	3,08
			8,12%	100,44	198,00	1568,86	3252	1,92	100,89%	26,51%	3,07%	8,63	2,97
		28	8,07%	100,23	197,03	1554,47	3254	1,94	101,95%	25,74%	3,10%	8,29	3,79
			7,73%	100,56	198,57	1576,90	3256	1,92	100,86%	26,53%	3,07%	8,64	3,70
			8,22%	100,66	197,80	1574,05	3251	1,91	100,46%	26,83%	3,06%	8,77	3,71
	2	7	8,28%	100,72	198,97	1585,22	3424	1,99	99,73%	23,53%	3,20%	7,36	4,00
			8,00%	100,68	199,02	1584,41	3403	1,99	99,44%	23,75%	3,19%	7,45	3,94
			7,86%	101,02	199,26	1596,89	3430	1,99	99,58%	23,64%	3,19%	7,41	3,89
		28	7,91%	100,24	198,90	1569,51	3421	2,02	101,00%	22,55%	3,24%	6,97	5,22
			7,87%	100,78	198,22	1581,12	3427	2,01	100,46%	22,97%	3,22%	7,14	5,22
			7,97%	101,00	198,53	1590,47	3426	2,00	99,76%	23,51%	3,20%	7,35	5,09
	2,1	7	8,09%	101,26	199,10	1603,33	3598	2,08	98,86%	20,41%	3,33%	6,13	5,59
			8,02%	100,94	199,27	1594,71	3593	2,09	99,33%	20,03%	3,34%	5,99	5,59
			7,96%	100,73	199,03	1586,14	3603	2,10	100,19%	19,33%	3,37%	5,73	5,54
		28	8,18%	100,52	198,47	1574,96	3600	2,11	100,62%	18,99%	3,39%	5,61	7,29
			7,91%	100,72	198,43	1580,97	3575	2,10	99,79%	19,66%	3,36%	5,85	7,20
			8,05%	101,10	197,67	1586,92	3584	2,09	99,52%	19,87%	3,35%	5,93	7,08
6	1,9	7	8,10%	100,12	198,77	1564,97	3259	1,93	101,39%	26,27%	3,70%	7,09	3,85
			8,08%	101,15	196,37	1577,84	3266	1,92	100,81%	26,69%	3,68%	7,25	3,54
			8,07%	100,77	196,58	1567,73	3259	1,92	101,25%	26,38%	3,70%	7,13	3,69
		28	8,13%	101,33	195,88	1579,66	3259	1,91	100,41%	26,99%	3,67%	7,36	4,13
			7,98%	100,11	199,75	1572,37	3266	1,92	101,24%	26,38%	3,70%	7,13	4,40
			8,22%	100,13	199,51	1570,87	3266	1,92	101,10%	26,48%	3,69%	7,17	4,26
	2	7	8,08%	100,94	198,50	1588,28	3437	2,00	100,10%	23,38%	3,85%	6,07	5,16
			8,29%	100,42	198,20	1569,74	3443	2,03	101,26%	22,49%	3,89%	5,77	5,14
			8,07%	101,13	199,34	1601,02	3446	1,99	99,58%	23,77%	3,83%	6,21	4,94
		28	8,14%	100,62	198,63	1579,42	3430	2,01	100,41%	23,14%	3,86%	5,99	6,07
			8,04%	100,78	198,30	1581,71	3433	2,01	100,46%	23,11%	3,86%	5,98	5,99
			8,23%	100,47	198,65	1574,74	3438	2,02	100,85%	22,80%	3,88%	5,88	6,15
	2,1	7	8,13%	100,51	199,37	1581,95	3605	2,11	100,36%	19,34%	4,05%	4,77	6,43
			7,99%	101,57	197,19	1597,77	3610	2,09	99,64%	19,92%	4,02%	4,95	6,28
			8,08%	100,21	199,47	1573,28	3597	2,12	100,73%	19,05%	4,07%	4,68	6,38
		28	8,07%	101,09	198,50	1593,04	3601	2,09	99,61%	19,95%	4,02%	4,96	7,86
			8,22%	100,50	197,06	1563,18	3603	2,13	101,41%	18,49%	4,10%	4,52	7,85
			7,76%	100,95	197,88	1583,79	3600	2,11	100,45%	19,26%	4,06%	4,75	7,88

## APÊNDICE C – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RTF: MISTURA FP

Cimento (%)	Yd (g/cm³)	Cura (dias)	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Yd medido (g/cm³)	GC (%)	η (%)	C <sub>s</sub> (%)	η/C <sub>s</sub>	RTF (MPa)
4	1,9	7	8,18%	101,07	99,00	4002,24	8148,2	1,88	99,05%	27,61%	2,41%	11,44	0,11
			8,10%	101,37	97,18	3940,59	8109,4	1,90	100,19%	26,78%	2,44%	10,97	0,13
			8,37%	101,55	96,97	3938,79	8174,9	1,92	100,80%	26,33%	2,46%	10,72	0,11
		28	8,26%	100,60	98,87	3978,39	8144,1	1,89	99,52%	27,27%	2,42%	11,25	0,15
			8,02%	101,37	98,13	3979,11	8169,0	1,90	100,03%	26,90%	2,44%	11,04	0,16
			8,28%	101,45	97,24	3946,00	8137,5	1,90	100,24%	26,74%	2,44%	10,95	0,14
	2,0	7	8,28%	101,77	99,51	4050,58	8688,7	1,98	99,05%	23,80%	2,54%	9,37	0,26
			8,21%	102,33	98,97	4051,04	8703,7	1,99	99,28%	23,63%	2,55%	9,28	0,25
			7,94%	102,12	98,26	4013,59	8718,9	2,01	100,62%	22,59%	2,58%	8,76	0,25
		28	8,44%	101,45	98,40	3993,07	8722,1	2,01	100,72%	22,52%	2,58%	8,72	0,30
			8,29%	101,50	99,07	4022,11	8711,3	2,00	100,00%	23,07%	2,56%	9,00	0,31
			8,12%	102,37	98,60	4037,34	8694,7	1,99	99,59%	23,39%	2,55%	9,16	0,29
	2,1	7	8,07%	103,43	96,51	3992,94	9056,8	2,10	99,94%	19,27%	2,69%	7,16	0,33
			8,21%	101,43	97,93	3973,48	9010,6	2,10	99,79%	19,39%	2,69%	7,22	0,33
			8,04%	101,84	98,21	4000,42	9076,7	2,10	100,00%	19,22%	2,69%	7,14	0,35
28		8,15%	101,32	98,40	3988,09	9043,7	2,10	99,84%	19,35%	2,69%	7,20	0,39	
		8,13%	102,47	97,10	3979,81	9065,3	2,11	100,31%	18,97%	2,70%	7,03	0,38	
		8,04%	101,84	98,30	4004,22	9076,1	2,10	99,90%	19,30%	2,69%	7,18	0,40	
5	1,9	7	8,33%	100,85	99,22	4002,53	8147	1,88	98,89%	27,85%	3,01%	9,25	0,23
			8,16%	100,43	98,85	3971,13	8110	1,89	99,37%	27,50%	3,03%	9,09	0,22
			8,07%	100,57	99,63	4008,05	8177	1,89	99,36%	27,51%	3,03%	9,09	0,24
		28	8,07%	100,30	99,77	4003,04	8145	1,88	99,10%	27,70%	3,02%	9,18	0,29
			8,07%	101,59	97,00	3941,56	8170	1,92	100,94%	26,36%	3,07%	8,57	0,28
			8,31%	101,63	98,47	4003,00	8189	1,89	99,40%	27,48%	3,03%	9,08	0,30
	2	7	8,28%	99,70	99,70	3976,17	8691	2,02	100,93%	22,49%	3,23%	6,95	0,36
			7,96%	100,86	100,32	4047,58	8705	1,99	99,61%	23,50%	3,19%	7,36	0,37
			8,02%	100,86	100,16	4040,85	8732	2,00	100,02%	23,19%	3,21%	7,23	0,39
		28	8,16%	101,66	100,50	4086,73	8728	1,97	98,73%	24,18%	3,16%	7,64	0,43
			7,92%	100,25	100,33	4023,50	8716	2,01	100,36%	22,92%	3,22%	7,13	0,43
			8,04%	101,07	99,00	4002,24	8699	2,01	100,59%	22,75%	3,22%	7,06	0,48
	2,1	7	8,16%	100,43	99,67	4003,94	9057	2,09	99,59%	19,69%	3,35%	5,88	0,61
			8,10%	102,07	97,16	3967,11	9015	2,10	100,10%	19,28%	3,37%	5,72	0,57
			8,01%	101,73	98,62	4013,18	9089	2,10	99,85%	19,49%	3,36%	5,80	0,58
28		8,27%	100,94	99,03	3998,17	9049	2,09	99,55%	19,73%	3,35%	5,89	0,74	
		8,00%	101,59	97,00	3941,56	9065	2,13	101,40%	18,23%	3,41%	5,34	0,74	
		8,04%	101,63	98,76	4014,92	9071	2,09	99,58%	19,70%	3,35%	5,88	0,70	
6	1,9	7	8,24%	100,81	98,31	3964,16	8161,12	1,90	100,10%	27,10%	3,66%	7,41	0,41
			8,02%	100,70	100,76	4058,61	8268,46	1,89	99,26%	27,71%	3,63%	7,64	0,39
			8,45%	102,42	98,13	4020,33	8187,20	1,88	98,83%	28,02%	3,61%	7,76	0,38
		28	8,05%	100,40	100,42	4033,00	8276,30	1,90	99,96%	27,20%	3,65%	7,45	0,50
			8,10%	99,70	99,95	3986,14	8254,83	1,92	100,83%	26,57%	3,68%	7,21	0,53
			8,11%	100,86	98,93	3991,50	8253,76	1,91	100,67%	26,68%	3,68%	7,25	0,51
	2	7	8,07%	102,04	100,39	4097,25	8812,92	1,99	99,51%	23,71%	3,83%	6,19	0,55
			7,94%	101,15	98,81	3997,98	8665,00	2,01	100,39%	23,04%	3,86%	5,97	0,55
			8,36%	101,14	99,90	4041,55	8699,99	1,99	99,33%	23,85%	3,82%	6,24	0,56
		28	8,32%	100,25	101,83	4083,52	8813,02	1,99	99,62%	23,63%	3,83%	6,17	0,70
			8,01%	101,61	100,22	4073,21	8748,62	1,99	99,43%	23,77%	3,82%	6,22	0,73
			7,92%	102,40	98,00	4013,95	8759,35	2,02	101,11%	22,49%	3,89%	5,78	0,72
	2,1	7	8,17%	100,89	98,08	3957,99	9101,57	2,13	101,23%	18,52%	4,09%	4,53	0,81
			8,37%	101,64	100,07	4068,45	9165,22	2,08	98,99%	20,32%	4,00%	5,08	0,77
			8,35%	101,78	99,69	4058,58	9162,86	2,08	99,23%	20,13%	4,01%	5,02	0,76
28		7,94%	102,40	99,34	4068,83	9196,25	2,09	99,71%	19,74%	4,03%	4,90	0,93	
		8,05%	102,83	98,40	4047,66	9205,91	2,10	100,23%	19,32%	4,05%	4,77	0,90	
		7,96%	103,06	98,08	4043,52	9242,40	2,12	100,82%	18,85%	4,07%	4,63	0,92	

## APÊNDICE D – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RTF: MISTURA REF

Cimento (%)	Yd (g/cm³)	Cura (dias)	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Yd medido (g/cm³)	GC (%)	η (%)	C <sub>w</sub> (%)	η/C <sub>w</sub>	RTF (MPa)
4	1,9	7	8,09%	100,17	100,98	4046,07	8255,2	1,89	99,35%	27,51%	2,42%	11,37	0,18
			8,34%	100,39	100,68	4043,04	8251,7	1,88	99,15%	27,65%	2,42%	11,45	0,19
			7,94%	100,25	99,43	3987,41	8252,1	1,92	100,91%	26,37%	2,46%	10,73	0,18
		28	8,33%	101,07	99,00	4002,24	8254,2	1,90	100,20%	26,88%	2,44%	11,01	0,22
			8,18%	101,37	97,98	3972,89	8249,4	1,92	101,02%	26,29%	2,46%	10,68	0,23
			8,10%	101,55	98,09	3984,42	8243,0	1,91	100,73%	26,50%	2,45%	10,80	0,21
	2,0	7	7,89%	100,85	100,70	4062,37	8805,4	2,01	100,45%	22,85%	2,58%	8,87	0,30
			8,30%	100,43	101,07	4060,18	8806,8	2,00	100,14%	23,08%	2,57%	8,99	0,30
			8,36%	100,57	100,84	4056,59	8797,8	2,00	100,07%	23,14%	2,57%	9,02	0,29
		28	8,32%	100,94	101,37	4092,91	8804,4	1,99	99,30%	23,73%	2,55%	9,32	0,39
			8,09%	101,59	100,33	4077,01	8824,8	2,00	100,13%	23,09%	2,57%	8,99	0,38
			8,01%	100,47	101,46	4077,21	8813,0	2,00	100,06%	23,15%	2,57%	9,02	0,38
	2,1	7	8,24%	100,48	101,76	4089,94	9272,7	2,09	99,74%	19,56%	2,69%	7,28	0,40
			8,20%	100,25	102,83	4123,62	9291,9	2,08	99,17%	20,02%	2,67%	7,50	0,39
			7,96%	101,61	101,30	4117,24	9336,1	2,10	100,02%	19,34%	2,69%	7,18	0,39
		28	8,09%	102,40	100,34	4109,79	9292,9	2,09	99,62%	19,66%	2,68%	7,33	0,48
			7,86%	102,83	99,81	4105,66	9312,2	2,10	100,13%	19,24%	2,70%	7,14	0,47
			8,17%	103,06	99,50	4101,92	9301,4	2,10	99,82%	19,50%	2,69%	7,25	0,48
5	1,9	7	8,25%	100,69	100,47	4046,40	8250,2	1,88	99,13%	27,79%	3,02%	9,21	0,32
			7,96%	100,70	98,67	3974,42	8216,1	1,91	100,78%	26,59%	3,07%	8,66	0,32
			8,21%	100,58	100,39	4038,89	8255,2	1,89	99,41%	27,59%	3,03%	9,11	0,32
		28	8,24%	99,70	100,05	3990,13	8239,2	1,91	100,40%	26,86%	3,06%	8,79	0,39
			8,20%	100,86	98,23	3962,99	8256	1,93	101,34%	26,18%	3,09%	8,48	0,40
			7,96%	101,66	99,15	4031,83	8251,6	1,90	99,77%	27,32%	3,04%	8,99	0,38
	2	7	8,23%	100,94	101,37	4092,91	8794	1,99	99,26%	23,89%	3,18%	7,51	0,47
			7,98%	101,59	100,00	4063,47	8766,2	2,00	99,90%	23,40%	3,20%	7,31	0,47
			8,11%	101,63	99,99	4064,79	8783	2,00	99,93%	23,38%	3,20%	7,30	0,47
		28	7,97%	100,85	99,70	4022,03	8793,7	2,02	101,25%	22,37%	3,25%	6,89	0,62
			8,11%	100,43	101,07	4060,18	8790,1	2,00	100,13%	23,22%	3,21%	7,24	0,64
			7,87%	100,57	100,84	4056,59	8779,6	2,01	100,32%	23,08%	3,22%	7,18	0,65
	2,1	7	8,36%	102,40	100,01	4096,14	9284,7	2,09	99,61%	19,80%	3,35%	5,91	0,62
			8,46%	102,83	99,17	4079,33	9304,5	2,10	100,14%	19,38%	3,37%	5,75	0,64
			8,41%	103,06	99,53	4103,29	9315,4	2,09	99,72%	19,72%	3,36%	5,88	0,65
		28	8,15%	101,61	101,30	4117,24	9303,6	2,09	99,49%	19,90%	3,35%	5,94	0,88
			8,28%	102,40	99,34	4068,83	9307,5	2,11	100,60%	19,01%	3,39%	5,62	0,88
			7,91%	102,83	98,74	4061,37	9308,9	2,12	101,15%	18,57%	3,40%	5,45	0,90
6	1,9	7	8,27%	100,56	97,77	3932,96	8199,6	1,93	101,35%	26,30%	3,70%	7,10	0,49
			8,19%	100,86	98,23	3962,99	8204,4	1,91	100,71%	26,77%	3,68%	7,27	0,49
			8,34%	100,21	100,20	4016,42	8253,6	1,90	99,83%	27,41%	3,65%	7,51	0,50
		28	8,27%	100,24	98,16	3935,82	8209,4	1,93	101,40%	26,27%	3,70%	7,09	0,68
			8,18%	101,55	98,16	3987,12	8215,9	1,90	100,25%	27,10%	3,66%	7,40	0,64
			8,36%	100,85	99,70	4022,03	8202,8	1,88	99,06%	27,97%	3,62%	7,73	0,64
	2	7	8,41%	100,43	98,93	3974,48	8664,1	2,01	100,54%	23,04%	3,87%	5,96	0,69
			8,16%	102,07	100,13	4088,11	8770,5	1,98	99,18%	24,09%	3,81%	6,31	0,67
			8,27%	101,73	99,97	4067,98	8788,6	2,00	99,77%	23,63%	3,84%	6,16	0,66
		28	8,09%	100,94	101,37	4092,91	8793,2	1,99	99,38%	23,93%	3,82%	6,26	0,78
			8,05%	101,59	99,00	4022,83	8784	2,02	101,05%	22,65%	3,89%	5,83	0,81
			8,36%	101,63	99,65	4051,24	8788,3	2,00	100,10%	23,38%	3,85%	6,07	0,80
	2,1	7	8,36%	103,32	99,81	4125,08	9302,6	2,08	99,10%	20,35%	4,00%	5,08	0,95
			8,06%	104,10	98,55	4103,61	9298,2	2,10	99,85%	19,75%	4,03%	4,90	0,98
			8,21%	103,79	97,13	4032,46	9207,8	2,11	100,48%	19,24%	4,06%	4,74	0,96
		28	8,00%	103,32	98,70	4079,07	9238,1	2,10	99,86%	19,74%	4,03%	4,90	1,11
			8,02%	104,10	98,55	4103,61	9326,1	2,10	100,19%	19,48%	4,05%	4,81	1,11
			7,97%	103,79	98,63	4094,73	9242,7	2,09	99,56%	19,99%	4,02%	4,97	1,15

## APÊNDICE E – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RTCD E MR: MISTURA FP

Cimento (%)	Yd (g/cm³)	Cura (dias)	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Yd medido (g/cm³)	GC (%)	η (%)	C <sub>s</sub> (%)	η/C <sub>s</sub>
4	1,9	7	7,82%	101,55	63,69	515,77	1063,1	1,91	100,61%	26,47%	2,45%	10,80
			7,82%	101,65	64,10	520,14	1065,8	1,90	100,02%	26,90%	2,44%	11,04
			7,82%	101,48	64,01	517,70	1065,7	1,91	100,48%	26,57%	2,45%	10,85
		28	7,92%	101,87	63,47	517,23	1065,3	1,91	100,44%	26,59%	2,45%	10,87
			7,92%	101,31	64,58	520,54	1067,6	1,90	100,02%	26,90%	2,44%	11,04
			7,92%	101,55	64,10	519,18	1068,4	1,91	100,36%	26,65%	2,44%	10,90
	2,0	7	7,81%	102,07	63,65	520,74	1123,6	2,00	100,06%	23,02%	2,57%	8,97
			7,81%	101,63	63,90	518,35	1118,6	2,00	100,08%	23,01%	2,57%	8,97
			7,81%	101,46	64,42	520,79	1123,3	2,00	100,03%	23,05%	2,56%	8,99
		28	7,87%	101,68	63,93	519,13	1125,1	2,01	100,45%	22,72%	2,58%	8,82
			7,87%	101,95	63,53	518,54	1124,6	2,01	100,52%	22,67%	2,58%	8,80
			7,87%	101,62	64,83	525,75	1125,2	1,98	99,20%	23,69%	2,54%	9,31
	2,1	7	7,72%	101,30	64,80	522,21	1172,3	2,08	99,24%	19,84%	2,67%	7,42
			7,72%	101,51	64,55	522,42	1175,8	2,09	99,50%	19,63%	2,68%	7,33
			7,72%	101,48	64,08	518,27	1176,4	2,11	100,34%	18,95%	2,70%	7,01
		28	7,84%	102,28	63,63	522,75	1175,7	2,09	99,30%	19,79%	2,67%	7,40
			7,84%	101,61	64,50	522,98	1174,9	2,08	99,20%	19,87%	2,67%	7,44
			7,84%	101,64	64,43	522,74	1177,1	2,09	99,43%	19,68%	2,68%	7,35
5	1,9	7	7,95%	101,43	64,37	520,08	1073,1	1,91	100,60%	26,61%	3,06%	8,69
			7,95%	101,58	63,87	517,53	1073,9	1,92	101,17%	26,19%	3,08%	8,50
			7,95%	101,34	64,41	519,52	1073,4	1,91	100,74%	26,51%	3,07%	8,64
		28	7,96%	101,64	63,74	517,13	1073,9	1,92	101,24%	26,14%	3,08%	8,48
			7,96%	102,34	63,60	523,11	1072,4	1,90	99,94%	27,09%	3,04%	8,90
			7,96%	101,62	64,38	522,11	1074,0	1,91	100,28%	26,84%	3,05%	8,79
	2	7	7,77%	101,68	64,30	522,07	1129,2	2,01	100,34%	22,94%	3,22%	7,13
			7,77%	102,07	64,19	525,21	1128,9	1,99	99,72%	23,42%	3,20%	7,33
			7,77%	101,55	64,36	521,20	1124,8	2,00	100,12%	23,11%	3,21%	7,20
		28	7,90%	101,67	63,70	517,14	1127,3	2,02	101,01%	22,43%	3,24%	6,93
			7,90%	101,37	64,54	520,83	1128,0	2,01	100,36%	22,93%	3,22%	7,13
			7,90%	101,89	64,16	523,06	1128,9	2,00	100,01%	23,20%	3,21%	7,24
	2,1	7	7,96%	101,66	64,36	522,39	1176,2	2,09	99,32%	19,92%	3,34%	5,96
			7,96%	101,51	63,83	516,55	1173,9	2,11	100,24%	19,17%	3,37%	5,68
			7,96%	101,90	63,87	520,86	1176,4	2,09	99,62%	19,67%	3,35%	5,87
		28	7,96%	101,37	63,50	512,44	1157,5	2,09	99,64%	19,66%	3,35%	5,86
			7,96%	101,89	62,63	510,62	1157,5	2,10	99,99%	19,37%	3,37%	5,76
			7,96%	100,49	64,67	512,87	1158,1	2,09	99,60%	19,68%	3,35%	5,87
6	1,9	7	7,82%	101,40	64,00	516,81	1070,5	1,92	101,11%	26,36%	3,69%	7,13
			7,82%	102,08	63,80	522,13	1072,8	1,91	100,30%	26,95%	3,66%	7,35
			7,82%	101,90	63,47	517,57	1073,4	1,92	101,24%	26,27%	3,70%	7,10
		28	7,78%	101,77	63,60	517,30	1064,1	1,91	100,45%	26,84%	3,67%	7,31
			7,78%	101,06	64,00	513,39	1064,1	1,92	101,22%	26,28%	3,70%	7,11
			7,78%	101,56	63,65	515,60	1062,1	1,91	100,59%	26,74%	3,68%	7,27
	2	7	8,34%	101,36	63,60	513,18	1122,0	2,02	100,90%	22,64%	3,88%	5,83
			8,34%	101,65	63,57	515,85	1127,7	2,02	100,89%	22,65%	3,88%	5,84
			8,34%	102,15	63,40	519,57	1121,9	1,99	99,65%	23,60%	3,83%	6,16
		28	8,33%	101,70	64,03	520,18	1119,4	1,99	99,33%	23,85%	3,82%	6,24
			8,33%	101,69	63,52	515,91	1114,9	1,99	99,75%	23,53%	3,84%	6,13
			8,33%	101,53	64,09	518,90	1123,3	2,00	99,92%	23,40%	3,84%	6,09
	2,1	7	7,76%	101,45	63,80	515,71	1164,2	2,10	99,76%	19,70%	4,03%	4,89
			7,76%	101,62	63,90	518,21	1169,5	2,09	99,73%	19,72%	4,03%	4,90
			7,76%	101,65	64,42	522,75	1173,6	2,08	99,21%	20,14%	4,01%	5,03
		28	7,71%	102,10	63,44	519,36	1165,3	2,08	99,19%	20,15%	4,01%	5,03
			7,71%	101,69	64,41	523,14	1172,0	2,08	99,04%	20,27%	4,00%	5,07
			7,71%	101,56	63,41	513,67	1168,1	2,11	100,54%	19,07%	4,06%	4,70



Cimento (%)	Yd (g/cm³)	Cura (dias)	RTCD (MPa)	Frequência 5Hz						Frequência 10Hz						Frequência 25Hz					
				MR 0° (MPa)	DP 0° (MPa)	CV 0° (%)	MR 90° (MPa)	DP 90° (MPa)	CV 90° (%)	MR 0° (MPa)	DP 0° (MPa)	CV 0° (%)	MR 90° (MPa)	DP 90° (MPa)	CV 90° (%)	MR 0° (MPa)	DP 0° (MPa)	CV 0° (%)	MR 90° (MPa)	DP 90° (MPa)	CV 90° (%)
4	1,9	7	0,22	3532,4	144,1	4,1	4179,9	192,7	4,6	3711,0	188,1	5,1	4659,3	233,9	5,0	4381,2	233,1	5,3	4586,2	327,9	7,2
			0,21	4430,6	188,3	4,3	4284,4	155,1	3,6	4665,6	253,8	5,4	4757,5	299,7	6,3	5082,3	440,6	8,7	5326,7	403,2	7,6
			0,23	4873,4	172,5	3,5	5014,5	349,5	7,0	5146,1	236,2	4,6	5514,7	335,8	6,1	5643,2	375,3	6,7	5355,2	242,6	4,5
		28	0,38	5971,2	203,6	3,4	-	-	-	4357,5	263,6	6,1	7189,0	595,3	8,3	5136,1	383,2	7,5	6111,1	404,6	6,6
			0,36	5934,6	419,0	7,1	4745,0	540,0	11,4	6156,0	234,5	3,8	4771,1	243,3	5,1	6471,5	300,9	4,7	5119,9	342,0	6,7
			0,36	5717,4	415,7	7,3	5497,0	169,9	3,1	6432,8	209,7	3,3	5652,6	231,2	4,1	6394,2	258,3	4,0	6485,0	463,0	7,1
	2,0	7	0,29	5899,1	402,9	6,8	5790,5	389,7	6,7	6232,3	446,2	7,2	5897,0	116,2	2,0	6708,6	355,6	5,3	6303,3	349,2	5,5
			0,37	6289,7	325,2	3,7	6615,6	218,3	3,3	7562,9	344,1	4,6	6438,0	558,2	8,7	7260,0	577,2	8,0	5555,5	382,8	6,9
			0,28	5245,3	286,4	5,5	4410,8	375,4	8,5	5460,4	421,5	7,7	4906,9	116,3	2,4	6152,3	212,3	3,5	5244,2	65,6	1,3
		28	0,47	6383,7	317,3	5,0	6110,1	236,5	3,9	6834,9	215,3	3,2	6543,5	233,6	3,6	6938,3	460,7	6,6	6916,4	241,4	3,5
			0,45	6795,3	487,2	7,2	6165,4	142,4	2,3	6937,3	333,7	4,8	6488,2	255,6	3,9	7172,9	491,3	6,9	6831,8	172,8	2,5
			0,47	-	-	-	6203,0	287,8	4,6	5563,8	101,8	1,8	6560,3	382,5	5,8	6733,0	233,6	3,5	6972,8	259,4	3,7
	2,1	7	-	6921,6	535,7	7,7	5638,0	344,5	6,1	7059,5	561,9	8,0	6285,6	484,0	7,7	6618,7	176,7	2,7	6321,1	152,3	2,4
			0,35	6687,1	179,9	2,7	6000,4	255,0	4,3	6079,8	234,7	3,9	6504,9	340,2	5,2	6621,9	354,9	5,4	6213,5	354,9	4,9
			0,38	7440,3	375,0	5,0	7216,2	388,2	5,4	8786,0	332,1	3,8	7535,8	456,7	6,1	8492,5	591,9	7,0	7856,4	366,1	4,7
		28	-	7623,5	535,2	7,0	7753,0	331,1	4,3	7638,1	229,1	3,0	8678,4	386,2	4,5	8022,5	482,2	6,0	9202,7	402,2	4,4
			0,58	7784,4	325,4	4,2	7583,8	357,2	4,7	8054,9	669,4	8,3	7954,6	593,4	7,5	8717,1	769,7	8,8	8324,3	887,4	10,7
			0,52	8232,4	658,6	8,0	-	-	-	8718,1	409,8	4,7	9021,0	720,8	8,0	8676,3	1082,8	12,5	10475,9	627,5	6,0
5	1,9	7	-	6517,4	191,0	2,9	-	-	6778,5	350,5	5,2	-	-	-	7295,5	670,5	9,2	-	-	-	
			0,41	6710,7	269,8	4,0	6433,9	267,0	4,2	6880,9	635,1	9,2	7729,0	456,8	5,9	6536,2	460,8	7,1	8035,0	463,6	5,8
			0,38	6432,8	481,2	7,5	6307,5	238,4	3,8	6574,9	618,0	9,4	6685,6	642,5	9,6	6572,8	209,7	3,2	7256,9	648,8	8,9
		28	0,55	7590,1	664,9	8,8	7814,6	420,4	5,4	8804,8	733,4	8,3	7961,9	656,9	8,3	8806,9	827,8	9,4	8673,2	596,7	6,9
			0,54	8512,3	303,9	3,6	8178,1	530,8	6,5	9049,2	529,4	5,9	8216,8	730,5	8,9	9217,4	729,1	7,9	7865,8	365,0	4,6
			0,52	6845,4	458,0	6,7	7569,2	436,0	5,8	7166,0	548,2	7,7	7654,8	323,0	4,2	8250,2	621,2	7,5	8410,0	330,5	3,9
	2	7	-	7984,9	477,5	6,0	6605,2	415,5	6,3	8438,2	374,7	4,4	7626,6	431,7	5,7	9304,0	805,7	8,7	8470,6	814,9	9,6
			0,47	7028,2	541,9	7,7	9001,2	787,6	8,8	7815,7	743,3	9,5	8892,5	422,4	4,8	7753,0	665,2	8,6	9475,3	560,9	5,9
			0,49	8460,1	228,4	2,7	8142,6	451,1	5,5	8877,9	558,4	6,3	7733,2	219,6	2,8	9190,2	663,5	7,2	8577,1	566,1	6,6
		28	0,60	9035,6	495,2	5,5	9162,0	373,8	4,1	8882,1	310,9	3,5	9410,6	272,9	2,9	10385,1	499,5	4,8	9761,5	1069,9	11,0
			0,68	8369,3	616,8	7,4	8906,1	645,7	7,3	8892,5	284,6	3,2	9412,7	434,9	4,6	9756,3	522,0	5,4	10093,7	565,2	5,6
			0,68	8461,2	389,2	4,6	9220,5	473,0	5,1	9136,9	534,5	5,9	9552,6	390,7	4,1	9888,9	695,2	7,0	9598,6	712,2	7,4
	2,1	7	0,57	9582,9	275,0	2,9	9072,2	578,8	6,4	10193,9	889,9	8,7	8908,2	204,9	2,3	9934,9	454,0	4,6	9976,7	539,7	5,4
			0,60	10103,1	479,9	4,8	10176,2	551,5	5,4	10384,6	287,7	2,8	10835,2	747,6	6,9	10149,6	478,0	4,7	11453,5	804,0	7,0
			0,58	9144,2	238,7	2,6	9426,2	758,8	8,1	9112,9	586,0	6,4	9697,8	577,0	6,0	10007,0	708,5	7,1	9559,3	566,9	5,9
		28	0,78	10999,2	431,2	3,9	11294,9	417,9	3,7	11487,0	567,5	4,9	12672,0	1067,0	8,4	12734,5	1072,2	8,4	12499,2	1432,4	11,5
			0,75	10701,2	287,9	2,7	10821,1	169,9	1,6	10243,0	695,5	6,8	11124,5	567,4	5,1	12073,4	653,2	5,4	12243,2	955,0	7,8
			0,53	8202,1	585,6	7,1	7791,7	427,0	5,5	8558,3	675,2	7,9	8810,0	728,6	8,3	9109,8	424,5	4,7	8571,9	416,6	4,9
6	1,9	7	0,44	8024,6	351,5	4,4	7551,4	419,1	5,6	8277,3	647,3	7,8	8459,1	443,3	5,2	8635,6	381,7	4,4	8290,9	639,2	7,7
			0,55	8932,2	694,0	7,8	7332,1	288,2	3,9	9320,8	477,2	5,1	7872,1	477,8	6,1	10122,9	494,0	4,9	8994,6	335,5	3,7
			0,71	9371,9	761,9	8,1	8851,8	437,3	4,9	9669,6	811,3	8,4	9425,2	951,9	10,1	10188,7	416,7	4,1	9710,3	724,4	7,5
		28	0,70	8406,9	496,8	5,9	7034,4	100,6	1,4	8621,0	712,1	8,3	7419,8	496,4	6,7	9359,4	578,4	6,2	-	-	-
			0,69	9093,1	607,4	6,7	7280,9	575,9	7,9	9040,4	753,1	8,3	8551,4	536,2	6,3	10760,0	971,6	9,0	8060,1	770,5	9,6
			0,71	9900,4	305,9	3,1	9718,7	342,1	3,5	10149,0	268,9	2,7	8635,6	362,7	4,2	10420,6	804,5	7,7	10246,1	186,5	1,8
	2	7	0,64	8253,3	413,5	5,0	-	-	-	10345,0	412,8	4,0	-	-	-	9164,1	406,9	4,4	10813,6	647,7	6,0
			0,64	8448,6	351,5	4,2	9211,1	343,6	3,7	10567,0	433,2	4,1	8939,5	362,1	4,1	9652,9	696,0	7,2	9788,7	367,1	3,8
			0,85	11357,5	788,2	6,9	10424,8	884,0	8,5	11008,6	806,9	7,3	11193,5	619,0	5,5	12932,5	1147,1	8,9	11662,4	618,1	5,3
		28	0,82	9622,0	544,6	5,7	9390,7	438,5	4,7	-	-	-	9824,2	720,1	7,3	9762,6	489,1	5,0	9994,4	775,6	7,8
			0,80	10511,0	1030,1	9,8	-	-	-	12188,8	965,4	7,9	-	-	-	12458,3	721,3	5,8	-	-	-
			0,85	10500,0	491,4	4,7	-	-	-	10540,0	680,9	6,5	11233,0	268,4	2,4	11812,2	825,7	7,0	11107,2	589,8	5,3
	2,1	7	-	11356,0	633,7	5,6	-	-	-	12879,0	584,7	4,5	12133,0	745,0	6,1	12763,0	610,1	4,8	12675,0	811,2	6,4
			0,79	11350,0	493,7	4,4	10834,6	308,8	2,9	11786,0	439,6	3,7	11323,0	245,7	2,2	11589,8	1336,3	11,5	11448,2	552,9	4,8
			1,04	12604,2	1535,2	12,2	12260,7	1505,6	12,3	12946,8	1091,4	8,4	12546,5	691,3	5,5	13586,0	1154,8	8,5	13789,9	787,4	5,7
		28	1,02	13550,0	715,4	5,3	12031,0	964,9	8,0	-	-	-	12423,7	660,9	5,3	13866,0	917,9	6,6	13532,0	811,9	6,0
			-	12556,4	482,2	3,8	11144,8	1238,2	11,1	12202,4	1503,3	12,3	13564,7	1234,4	9,1	14265,0	977,2	6,9	12095,9	443,9	3,7

## APÊNDICE F – RESULTADOS GERAIS ENSAIO DE RTCD E MR: MISTURA REF

Cimento (%)	Yd (g/cm³)	Cura (dias)	w (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm³)	Peso (g)	Yd medido (g/cm³)	GC (%)	η (%)	C <sub>s</sub> (%)	η/C <sub>s</sub>
4	1,9	7	8,07%	101,50	64,80	524,31	1067,6	1,88	99,17%	27,64%	2,42%	11,44
			8,07%	101,28	64,11	516,48	1064,5	1,91	100,38%	26,76%	2,45%	10,94
			8,07%	100,67	64,95	516,96	1062,9	1,90	100,14%	26,93%	2,44%	11,04
		28	7,91%	100,53	65,30	518,24	1068,8	1,91	100,59%	26,60%	2,45%	10,86
			7,91%	100,46	65,80	521,54	1069,4	1,90	100,01%	27,03%	2,44%	11,10
			7,91%	100,56	65,32	518,73	1067,1	1,91	100,33%	26,79%	2,44%	10,96
	2,0	7	7,76%	101,00	64,84	519,45	1125,9	2,01	100,57%	22,75%	2,58%	8,82
			7,76%	101,70	63,90	519,06	1130,3	2,02	101,04%	22,39%	2,59%	8,64
			7,76%	101,50	64,00	517,83	1123,5	2,01	100,67%	22,68%	2,58%	8,79
		28	7,71%	101,19	65,04	523,07	1127,6	2,00	100,07%	23,13%	2,57%	9,02
			7,71%	101,24	64,70	520,76	1128,6	2,01	100,61%	22,72%	2,58%	8,81
			7,71%	100,93	65,17	521,39	1128,2	2,01	100,45%	22,85%	2,58%	8,87
	2,1	7	8,15%	101,50	64,40	521,07	1180,9	2,10	99,78%	19,53%	2,69%	7,27
			8,15%	101,99	63,43	518,25	1178,7	2,10	100,14%	19,24%	2,70%	7,14
			8,15%	101,52	64,11	518,93	1181,9	2,11	100,28%	19,13%	2,70%	7,08
		28	8,23%	100,86	64,58	515,93	1168,6	2,09	99,65%	19,63%	2,68%	7,32
			8,23%	101,49	64,72	523,62	1181,1	2,08	99,24%	19,96%	2,67%	7,47
			8,23%	101,53	64,05	518,52	1178,1	2,10	99,96%	19,38%	2,69%	7,20
5	1,9	7	7,99%	101,35	63,70	513,88	1062,7	1,92	100,79%	26,58%	3,07%	8,66
			7,99%	101,06	63,98	513,25	1065,4	1,92	101,17%	26,30%	3,08%	8,54
			7,99%	101,88	63,63	518,67	1059,5	1,89	99,56%	27,48%	3,03%	9,06
		28	8,08%	101,33	64,07	516,64	1069,5	1,92	100,80%	26,57%	3,07%	8,66
			8,08%	101,27	64,41	518,79	1066,9	1,90	100,14%	27,05%	3,05%	8,87
			8,08%	101,52	64,35	520,90	1063,0	1,89	99,37%	27,61%	3,03%	9,13
	2	7	7,76%	101,85	64,42	524,77	1124,6	1,99	99,43%	23,76%	3,19%	7,45
			7,76%	101,65	64,04	519,75	1124,8	2,01	100,41%	23,01%	3,22%	7,15
			7,76%	101,46	64,73	523,39	1121,6	1,99	99,43%	23,76%	3,19%	7,46
		28	7,94%	101,31	64,54	520,28	1124,3	2,00	100,10%	23,24%	3,21%	7,24
			7,94%	101,33	64,97	523,93	1126,9	1,99	99,64%	23,60%	3,19%	7,39
			7,94%	101,49	64,72	523,49	1122,5	1,99	99,33%	23,84%	3,18%	7,49
	2,1	7	8,12%	101,49	63,78	515,98	1175,7	2,11	100,35%	19,21%	3,38%	5,69
			8,12%	101,86	63,60	518,22	1182,1	2,11	100,46%	19,12%	3,38%	5,65
			8,12%	102,12	63,84	522,84	1180,3	2,09	99,42%	19,95%	3,35%	5,96
		28	8,33%	101,40	64,40	520,04	1184,1	2,10	100,09%	19,42%	3,37%	5,77
			8,33%	101,86	63,55	517,78	1178,0	2,10	100,00%	19,49%	3,37%	5,79
			8,33%	101,66	63,91	518,73	1174,2	2,09	99,50%	19,89%	3,35%	5,94
6	1,9	7	7,79%	101,51	64,78	524,21	1070,7	1,89	99,74%	27,48%	3,64%	7,54
			7,79%	101,22	64,58	519,62	1069,1	1,91	100,47%	26,94%	3,67%	7,34
			7,79%	101,60	64,27	521,04	1069,0	1,90	100,18%	27,15%	3,66%	7,42
		28	7,77%	101,53	64,00	518,17	1071,6	1,92	101,00%	26,56%	3,69%	7,20
			7,77%	101,70	64,40	523,12	1071,4	1,90	100,02%	27,27%	3,65%	7,46
			7,77%	101,80	64,17	522,25	1072,2	1,91	100,27%	27,09%	3,66%	7,39
	2	7	7,87%	101,80	64,29	523,23	1129,6	2,00	100,06%	23,41%	3,85%	6,08
			7,87%	101,30	64,64	520,92	1125,3	2,00	100,13%	23,36%	3,85%	6,07
			7,87%	101,60	64,40	522,10	1131,8	2,01	100,48%	23,09%	3,86%	5,97
		28	7,99%	101,77	64,21	522,26	1128,6	2,00	100,05%	23,42%	3,85%	6,08
			7,99%	101,77	64,59	525,36	1129,6	1,99	99,55%	23,80%	3,83%	6,22
			7,99%	101,50	64,59	522,61	1126,0	2,00	99,76%	23,64%	3,84%	6,16
	2,1	7	7,73%	101,78	63,59	517,39	1174,7	2,11	100,36%	19,34%	4,05%	4,77
			7,73%	101,67	64,58	524,24	1181,9	2,09	99,66%	19,91%	4,02%	4,95
			7,73%	101,57	64,44	522,05	1179,4	2,10	99,86%	19,74%	4,03%	4,89
		28	7,81%	101,50	64,42	521,20	1180,1	2,10	100,01%	19,62%	4,04%	4,86
			7,81%	102,00	64,37	525,94	1187,8	2,09	99,75%	19,83%	4,03%	4,92
			7,81%	101,81	64,10	521,88	1176,0	2,09	99,53%	20,01%	4,02%	4,98

Cimento (%)	Yd (g/cm³)	Cura (dias)	RTCD (MPa)	Frequência 5Hz						Frequência 10Hz						Frequência 25Hz							
				MR 0° (MPa)	DP 0° (MPa)	CV 0° (%)	MR 90° (MPa)	DP 90° (MPa)	CV 90° (%)	MR 0° (MPa)	DP 0° (MPa)	CV 0° (%)	MR 90° (MPa)	DP 90° (MPa)	CV 90° (%)	MR 0° (MPa)	DP 0° (MPa)	CV 0° (%)	MR 90° (MPa)	DP 90° (MPa)	CV 90° (%)		
4	1,9	7	-	10856,1	624,2	5,8	8990,7	308,4	3,4	10782,0	452,8	4,2	9089,9	604,5	6,7	10200,0	707,9	6,9	9965,1	775,3	7,8		
			0,37	10486,4	464,5	4,4	10695,3	374,3	3,5	10904,2	380,6	3,5	10371,0	836,9	8,1	9670,7	375,2	3,9	11942,3	590,0	4,9		
			0,32	10194,1	635,1	6,2	10032,0	271,9	2,7	10986,7	357,1	3,3	9903,6	288,2	2,9	11718,8	820,3	7,0	10096,8	674,5	6,7		
		0,48	11292,0	624,4	5,5	11086,5	154,1	1,4	12133,0	701,3	5,8	11863,0	587,2	5,0	12950,0	538,7	4,2	12860,0	486,1	3,8			
		0,47	11333,4	1065,3	9,4	11522,2	922,9	8,0	12103,2	973,1	8,0	11568,6	1217,0	10,5	12599,8	1575,0	12,5	12283,9	756,7	6,2			
		0,44	11724,1	776,1	6,6	11877,1	806,5	6,8	12114,7	691,7	5,7	11158,1	739,8	6,6	12372,7	1008,4	8,2	11816,6	963,0	8,2			
	2,0	7	-	11135,0	815,1	7,3	11464,0	339,3	3,0	11290,6	825,3	7,3	11455,6	995,5	8,7	11789,0	378,4	3,2	12019,5	833,0	6,9		
			0,38	10303,0	466,7	4,5	11569,5	624,8	5,4	11193,3	173,5	1,6	11931,9	807,8	6,8	12134,4	299,7	2,5	12292,2	378,6	3,1		
			0,57	-	-	-	14255,8	390,6	2,7	-	-	-	15524,8	860,1	5,5	-	-	-	14370,9	1506,1	10,5		
		28	0,61	14032,5	1087,5	7,8	13480,8	1296,9	9,6	14721,2	1282,2	8,7	14719,1	1380,7	9,4	15303,4	950,3	6,2	15828,8	1068,4	6,8		
			0,56	13307,5	1288,2	9,7	14912,7	924,6	6,2	14881,3	1546,2	10,4	14102,3	1508,9	10,7	15133,0	1490,6	9,9	14083,5	1064,7	7,6		
			0,52	12028,6	322,4	2,7	11781,5	494,8	4,2	13879,0	992,3	7,2	13386,0	1242,2	9,3	12879,0	1041,9	8,1	13876,0	749,3	5,4		
			0,57	12240,5	761,4	6,2	12138,7	767,2	6,3	14642,0	1102,5	7,5	13432,0	812,6	6,1	13876,0	290,0	2,1	13024,9	1147,5	8,8		
			0,72	17630,2	1313,4	7,5	15210,3	830,5	5,5	-	-	-	17082,3	1534,0	9,0	-	-	-	18801,5	1765,5	9,4		
			0,73	16438,7	1269,1	7,7	-	-	-	17569,0	435,7	2,5	-	-	-	18491,3	1137,2	6,2	-	-	-		
		5	1,9	7	0,63	14886,2	1128,4	7,6	13195,7	667,7	5,1	15141,7	1505,1	9,9	14079,3	1395,3	9,9	14765,0	541,9	3,7	14867,3	600,6	4,0
					0,70	14112,7	1146,0	8,1	14716,0	888,8	6,0	13762,8	264,2	1,9	15045,4	857,6	5,7	14604,7	737,5	5,1	-	-	-
					-	13806,7	1380,7	10,0	13385,8	706,8	5,3	14865,7	735,8	5,0	13434,9	1213,2	9,0	14030,7	848,9	6,1	14533,7	1283,3	8,8
				0,80	15112,1	1190,8	7,9	15869,2	860,1	5,4	13858,9	1162,8	8,4	16229,0	936,4	5,8	15742,2	1454,6	9,2	15759,7	496,4	3,2	
				0,74	14140,9	704,2	5,0	15584,4	1271,7	8,2	14551,9	346,3	2,4	15680,0	572,3	3,7	15064,1	864,7	5,7	16379,2	895,9	5,5	
				0,71	14479,8	657,4	4,5	14947,3	606,9	4,1	15874,6	1285,8	8,1	14947,3	874,4	5,9	-	-	-	14751,9	871,8	5,9	
			2	7	0,71	15475,0	826,4	5,3	15547,8	702,8	4,5	16016,5	1584,0	9,9	15896,7	1247,9	7,9	17824,3	1395,6	7,8	15831,3	414,8	2,6
					0,78	15738,8	1437,0	9,1	15422,9	950,1	6,2	17724,8	1783,1	10,1	15782,7	991,2	6,3	15200,6	1504,9	9,9	15926,4	466,6	2,9
					0,70	15213,6	1177,5	7,7	15951,4	523,2	3,3	16111,7	1309,9	8,1	15237,0	751,2	4,9	17518,3	1161,5	6,6	15422,9	1314,0	8,5
0,90	18902,6			1565,1	8,3	18400,2	1299,1	7,1	18807,6	914,0	4,9	18600,8	602,7	3,2	18787,7	843,6	4,5	18938,1	880,6	4,7			
0,91	17542,7			1171,9	6,7	17777,7	727,1	4,1	19182,5	790,3	4,1	18311,5	1388,0	7,6	17991,9	932,0	5,2	19197,2	1027,0	5,4			
0,97	17123,9			1171,3	6,8	17020,5	862,9	5,1	18026,3	299,2	1,7	18648,8	695,6	3,7	18496,3	1265,1	6,8	18851,4	1508,1	8,0			
2,1	7		0,88	18160,0	819,0	4,5	18559,0	1180,4	6,4	18716,1	1566,5	8,4	19161,2	735,8	3,8	18819,1	1514,9	8,1	19101,1	783,1	4,1		
			0,84	17228,4	589,2	3,4	17678,5	855,6	4,8	18475,9	1494,7	8,1	17861,3	1128,8	6,3	19366,7	1102,0	5,7	18329,7	1101,6	6,0		
			0,93	19674,5	1017,2	5,2	18139,1	1482,0	8,2	17938,6	1471,0	8,2	19337,7	1374,9	7,1	18553,8	1619,7	7,7	19177,9	736,4	3,8		
	1,13		20991,5	785,1	3,7	21065,7	722,6	3,4	20035,4	1324,3	6,6	20905,3	1200,0	5,7	21411,4	1539,5	7,2	20670,9	977,7	4,7			
	1,21		19296,4	1464,6	7,6	-	-	-	19891,1	871,2	4,4	-	-	-	20283,4	1229,2	6,1	-	-	-			
	1,13		19364,3	1020,5	5,3	20402,5	1201,7	5,9	20861,0	1687,7	8,1	20697,6	790,6	3,8	20826,5	1522,4	7,3	21354,0	1618,6	7,6			
6	1,9	7	-	16918,2	417,9	2,5	17935,5	895,0	5,0	16103,5	1545,9	9,6	17647,8	1754,2	9,9	17882,1	1062,2	5,9	17496,9	1546,7	8,8		
			0,85	16742,7	761,8	4,6	16244,5	669,3	4,1	17375,6	1463,0	8,4	16167,6	962,0	6,0	16971,9	719,6	4,2	17184,8	933,1	5,4		
			0,81	16592,3	927,5	5,6	-	-	-	17442,5	833,8	4,8	18862,9	956,4	5,1	17442,5	941,9	5,4	17611,7	1213,4	6,9		
		0,98	18471,3	910,6	4,9	18508,3	503,4	2,7	18751,6	785,7	4,2	19435,2	975,6	5,0	20549,6	1387,1	6,8	19652,0	642,6	3,3			
		0,99	20104,8	894,7	4,5	17926,1	261,7	1,5	21022,9	592,8	2,8	19000,8	1147,6	6,0	21110,3	1254,0	5,9	19785,9	1266,3	6,4			
		-	20081,4	570,3	2,8	-	-	-	20374,9	698,9	3,4	20130,0	539,5	2,7	21445,4	643,4	3,0	20239,2	1605,0	7,9			
	2	7	1,02	18108,8	621,1	3,4	18023,8	1180,6	6,6	17544,8	1314,1	7,5	18869,2	1896,4	10,1	19004,3	1299,9	6,8	18624,2	1124,9	6,0		
			1,08	17467,1	850,6	4,9	-	-	-	18632,1	1481,3	8,0	-	-	-	18729,2	891,5	4,8	19458,1	1589,7	8,2		
			1,05	17527,5	1041,1	5,9	17992,3	658,5	3,7	17343,2	1082,2	6,2	19148,1	651,0	3,4	18747,5	1391,1	7,4	19908,4	1759,9	8,8		
		1,23	22564,5	1281,7	5,7	21938,7	989,4	4,5	22703,0	1262,3	5,6	21840,1	829,9	3,8	22732,8	1095,7	4,8	22292,2	976,4	4,4			
		1,15	21529,4	740,6	3,4	21342,6	612,5	2,9	23109,7	1349,6	5,8	22033,9	1255,9	5,7	23451,8	1348,5	5,8	22727,4	606,8	2,7			
		1,21	21931,0	1897,0	8,7	22150,0	868,3	3,9	22711,8	1353,6	6,0	22304,1	1166,5	5,2	22372,3	1635,4	7,3	22349,5	1090,7	4,9			
	2,1	7	1,13	22461,1	864,8	3,9	22787,9	809,0	3,6	22814,1	841,8	3,7	22170,1	314,8	1,4	23759,2	1998,2	8,4	23884,0	1311,2	5,5		
			1,29	22440,9	1582,1	7,1	22585,4	560,1	2,5	23023,6	1045,3	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			1,58	23325,5	1119,6	4,8	23529,7	1367,1	5,8	24218,9	1060,8	4,4	23291,6	1176,2	5,1	24807,5	1136,2	4,6	24739,9	1405,2	5,7		
		1,61	23445,0	881,5	3,8	-	-	-	23413,6	908,4	3,9	24716,0	832,9	3,4	24212,5	1167,0	4,8	23558,0	1302,8	5,5			
		1,55	23102,7	656,1	2,8	-	-	-	22603,0	1317,8	5,8	25227,9	2008,1	8,0	23795,9	528,3	2,2	24075,0	1035,2	4,3			