



**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO  
MESTRADO ACADÊMICO EM AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

**ANDREA STUMM**

**REAPROVEITAMENTO DE MATERIAL FRESADO DE REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS ATRAVÉS DA RECICLAGEM COM ADIÇÃO DE CIMENTO EM  
CAMADAS DE PAVIMENTOS**

**CANOAS, 2020**

ANDREA STUMM

**REAPROVEITAMENTO DE MATERIAL FRESADO DE REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS ATRAVÉS DA RECICLAGEM COM ADIÇÃO DE CIMENTO EM  
CAMADAS DE PAVIMENTOS**

Dissertação de Mestrado apresentada à Banca examinadora do Programa de Pós-graduação em Avaliação de Impactos Ambientais da Universidade La Salle – UNILASALLE, para obtenção do título de Mestre em Avaliação de Impactos Ambientais.

Orientação: Prof. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Siqueira Souza

Coorientação: Prof. Dr. Rodrigo Malysz

CANOAS, 2020

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S934r Stumm, Andrea.

Reaproveitamento de material fresado de revestimentos asfálticos através da reciclagem com adição de cimento em camadas de pavimentos [manuscrito] / Andrea Stumm – 2020.

142 f.; 30 cm.

Dissertação (mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais) – Universidade La Salle, Canoas, 2020.

“Orientação: Prof<sup>a</sup>. Dra. Fernanda Siqueira Souza”.

1. Resíduos. 2. Material fresado. 3. Reciclagem. 4. Dimensionamento do pavimento. I. Souza, Fernanda Siqueira. II. Título.

CDU: 625.85

Bibliotecária responsável: Melissa Rodrigues Martins - CRB 10/1380

ANDREA STUMM

Dissertação aprovada para obtenção do título de mestre, pelo Programa de Pós-Graduação Avaliação de Impactos Ambientais, da Universidade La Salle.

**BANCA EXAMINADORA**



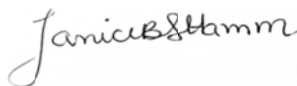
---

Prof. Dr. William Fedrigo  
Universidade Federal de Santa Maria



---

Prof. Dr. Bóris Casanova Sokolovicz  
Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões



---

Prof.ª Dr.ª Janice Botelho Souza Hamm  
Universidade La Salle



---

Prof. Dr. Rodrigo Malysz  
Coorientador - Universidade do Vale do Rio dos Sinos



---

Prof.ª Dr.ª Fernanda Siqueira Souza  
Orientadora e Presidente da Banca - Universidade La Salle

**Área de concentração:** Avaliação de Impactos Ambientais

**Curso:** Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais

Canoas, 25 de setembro de 2020.

Dedico aos meus pais, Valdir e Gládis e ao meu marido Diogo, alicerces desta conquista.

## AGRADECIMENTOS

Gratidão em primeiro lugar a Deus, pela oportunidade de estar realizando este trabalho e por ter me dado forças para nunca desistir.

Aos meus pais, Valdir e Gládis Stumm, pelo apoio incondicional, pelos valores ensinados, pelo exemplo de caráter e pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu marido, Diogo Dossa, pela paciência, atenção, amor e por estar sempre ao meu lado com palavras de apoio nos momentos dedicados à pesquisa.

À minha orientadora prof. Dra Fernanda Siqueira Souza pela contribuição e pelos esclarecimentos prestados.

Ao meu coorientador, professor, doutor, colega de trabalho e amigo Rodrigo Malysz, por ter me auxiliado por tantas vezes e por contribuir com a sua vasta experiência para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao prof. Dr. Sydney Sabedot pela dedicação e suporte dado sempre que necessário.

Aos amigos que conquistei ao longo do mestrado, serei eternamente grata pelos momentos compartilhados ao longo desta jornada.

Aos professores da Universidade La Salle por terem transmitido suas experiências e repassado o seu conhecimento.

À Ecoplan Engenharia Ltda., pela oportunidade e pela confiança, que ao longo destes 16 anos de trabalho, tem proporcionado meu crescimento pessoal e profissional a cada dia. Aos meus colegas de trabalho pelo apoio, pelo ambiente agradável de amizade e cooperação.

Aos colegas do Laboratório da Ecoplan Engenharia Ltda., em especial ao Eng<sup>o</sup> Juliano Rodrigues, Geól. Carlos Granvilla, Eng<sup>o</sup> Daniel Pinheiro Fernandes e ao Auxiliar de Laboratório Arthur Ribeiro que me auxiliaram e me deram todo o apoio para a realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao prof. Dr. Luciano Specht e Eng<sup>o</sup> Fernando Zucchi, por terem gentilmente realizado os ensaios de módulo de resiliência e tração por compressão diametral.

Aos demais familiares, amigos e a todas as pessoas que de alguma forma participaram e contribuíram para este momento.

## RESUMO

Segundo Bonfim (2011), centenas de metros cúbicos de material fresado de pavimentos deteriorados são gerados diariamente das atividades de conservação e manutenção de rodovias. A possibilidade de reaproveitamento deste resíduo através da reciclagem surge como uma alternativa sustentável, diminuindo a exploração de jazidas para extração de agregados naturais, além de reduzir a quantidade de resíduos a serem depositados em aterros irregulares. Neste cenário, este estudo tem como objetivo principal analisar o reaproveitamento do material fresado de revestimentos asfálticos através da reciclagem com adição de cimento e a sua aplicação em novas camadas de pavimento, como uma alternativa para o emprego dos resíduos gerados pela reabilitação de pavimentos. O material fresado analisado foi oriundo da RSC-480. Foram estudadas as misturas de fresado e agregados, nas proporções: 50/50, 70/30, com teores de cimento de 0%, 3% e 6% para cada mistura, além do fresado puro. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, compactação à energia Proctor modificada, Índice de Suporte Califórnia (ISC), bem como de Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e Módulo de Resiliência (MR) para avaliar as propriedades mecânicas das misturas e a viabilidade de utilização em camadas de pavimento. Nos ensaios de ISC realizados para as misturas sem adição de cimento, concluiu-se a utilização do fresado puro somente para camadas de sub-base. A mistura 70/30 alcançou valores para utilização em sub-base e base de pavimentos para baixos volumes de tráfego, enquanto a mistura 50/50 poderá ser empregada em bases para altos volumes de tráfego. Nos ensaios de RCS e RTCD, as misturas com adição de 3% de cimento resultaram em resistências dentro dos parâmetros estabelecidos por DNIT 167/2013-ES, entre 2,1 e 2,5 MPa para a RCS e de 0,25 e 0,35 MPa para a RTCD, enquanto as misturas com adição de 6% de cimento alcançaram valores superiores aos limites recomendados na norma. Quanto aos ensaios de MR, observou-se ganho de rigidez para maiores teores de cimento. Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais viabilizam o emprego do material fresado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Esta pesquisa contemplou ainda, o comportamento das misturas na estrutura do pavimento, através de análises mecanísticas realizadas com o auxílio do software *Everstress*, bem como aplicação de modelos de previsão de desempenho para análise da vida de fadiga. O método da AASHTO foi utilizado para o pré-dimensionamento das estruturas, que foram utilizadas como ponto de partida no programa *Everstress*. As análises permitiram determinar as tensões na face inferior da camada de base cimentada, embaixo dos pneus e entre os pneus. Os resultados obtidos no projeto de dimensionamento das estruturas, compostas de base das misturas recicladas estudadas reforçam o potencial de utilização do material fresado em camadas de pavimentos verificados nos ensaios de laboratório. As análises mecanísticas resultaram em espessuras de base entre 30 e 40 cm, no entanto é importante ressaltar que para a escolha da melhor alternativa é necessária a análise econômica das estruturas dimensionadas.

**Palavras-chave:** Resíduos. Material fresado. Reciclagem. Dimensionamento do pavimento.

## ABSTRACT

According to Bonfim (2011), hundreds of cubic meters of reclaimed asphalt from deteriorated pavements are generated daily from highway conservation and maintenance activities. The possibility of reusing this waste through recycling appears as a sustainable alternative, reducing the exploitation of deposits for the extraction of natural aggregates, in addition to reducing the amount of waste to be deposited in irregular landfills. In this scenario, this study has as main objective to analyze the reuse of the reclaimed asphalt pavement coatings through recycling with addition of cement and its application in new layers of pavement, as an alternative for the use of residues generated by the rehabilitation of pavements. The reclaimed asphalt pavement analyzed came from RSC-480. The reclaimed asphalt pavement and aggregate mixtures were studied, in the proportions: 50/50, 70/30, with cement contents of 0%, 3% and 6% for each mixture, in addition to pure milling. Materials characterization tests, compaction with modified Proctor energy, California Bearing Ratio (CBR), as well as Simple Compression Strength (RCS), Diametral Compression Tensile Strength (RTCD) and Resilience Module (MR) were performed for evaluate the mechanical properties of the mixtures and the feasibility of using them in pavement layers. In the ISC tests carried out for mixtures without the addition of cement, the use of pure milling was concluded only for sub-base layers. The 70/30 mixture reached values for use in sub-base and pavement base for low traffic volumes, while the 50/50 mixture can be used in bases for high traffic volumes. In the RCS and RTCD tests, mixtures with the addition of 3% cement resulted in strengths within the parameters established by DNIT 167/2013-ES, between 2,1 and 2,5 MPa for the RCS and 0,25 and 0,35 MPa for RTCD, while mixtures with the addition of 6% cement reached values above the limits recommended in the standard. As for the MR tests, there was a gain in stiffness for higher cement contents. The results obtained in the laboratory tests make it possible to use the reclaimed asphalt pavement in base and sub-base layers of pavements. This research also contemplated the behavior of mixtures in the pavement structure, through mechanistic analyzes carried out with the aid of the Everstress software, as well as the application of performance forecasting models for the analysis of fatigue life. The AASHTO method was used to pre-design the structures, which were used as a starting point in the Everstress program. The analyzes made it possible to determine the stresses on the underside of the cemented base layer, under the tires and between the tires. The results obtained in the project of dimensioning the structures, composed of the base of the studied recycled mixtures reinforce the potential of using the reclaimed asphalt pavement in layers of pavements verified in the laboratory tests. The mechanistic analyzes resulted in base thicknesses between 30 and 40 cm, however it is important to emphasize that the economic analysis of the dimensioned structures is necessary to choose the best alternative.

Keywords: Waste. Reclaimed Asphalt Pavement. Recycling. Pavement design.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas genéricas do pavimento.....	18
Figura 2 - Estrutura-tipo de um pavimento flexível .....	20
Figura 3 - Campo de tensões pavimento flexível .....	20
Figura 4 - Campo de tensões pavimento rígido .....	21
Figura 5 - Estrutura-tipo de um pavimento rígido.....	21
Figura 6 - Equipamentos de fresagem de pequeno, médio e grande porte.....	24
Figura 7 - Fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem .....	25
Figura 8 -. Tensões e deformações atuantes na estrutura do pavimento .....	48
Figura 9 - Esquema de proposta de método de dimensionamento .....	49
Figura 10 - Fluxograma das etapas de trabalho.....	52
Figura 11 - Mapa de situação e localização da RSC-480 .....	54
Figura 12 - Fresagem do pavimento RSC-480 .....	55
Figura 13 – Pavimento fresado RSC-480.....	55
Figura 14 – Pilha de material fresado .....	55
Figura 15 - Coleta do material fresado .....	55
Figura 16 - Material fresado .....	56
Figura 17 - Pedrisco ½” .....	56
Figura 18 - Filler.....	56
Figura 19 - Secagem do fresado .....	57
Figura 20 - Secagem dos agregados .....	57
Figura 21 – Repartidor de amostras.....	57
Figura 22 – Pesagem da amostra representativa seca.....	57
Figura 23 – Peneiramento dos materiais .....	57
Figura 24 – Granulometria do fresado retido em cada peneira .....	58
Figura 25 - 50% fresado, 50% agregados.....	60
Figura 26 - 70% fresado, 30% agregados.....	60
Figura 27 - Ensaio de compactação.....	61
Figura 28 - Extração de molde .....	61
Figura 29 - Pesagem para obtenção da umidade .....	61
Figura 30 - Compactação e moldagem do CP .....	63
Figura 31 – Corpos de prova imersos em água .....	63
Figura 32 - Ensaio de penetração .....	63

Figura 33 - Moldagem e compactação do CP .....	65
Figura 34 - Prensa hidráulica.....	65
Figura 35 - Corpo de prova após ruptura.....	65
Figura 36 - Ensaio de RTDC .....	66
Figura 37 - Ruptura do CP.....	66
Figura 38 - Detalhe separação em duas partes .....	66
Figura 39 - Ensaio de módulo de resiliência na compressão diametral.....	67
Figura 40 - Tela inicial programa <i>Everstress</i> .....	70
Figura 41 - Tela de inserção de dados do <i>Everstress</i> .....	71
Figura 42 - Tela para inserção de dados de carregamentos.....	71
Figura 43 - Eixo padrão rodoviário - ESRD.....	73
Figura 44 - Representação esquemática do semi-eixo padrão.....	73
Figura 45 - Curva granulométrica do material fresado.....	76
Figura 46 - Comparativo de curvas granulométricas do material fresado em outros estudos..	77
Figura 47 - Estabilização do fresado para as misturas 70/30 e 50/50 .....	79
Figura 48 - Curvas de compactação .....	79
Figura 49 - Efeito do teor de fresado no ISC.....	81
Figura 50 - Relação teor de fresado e cimento x RCS nas misturas.....	83
Figura 51 - Comparativo de resultados resistência compressão simples (RCS) .....	84
Figura 52 - Relação teor de fresado e cimento x RTCD – 7 dias .....	86
Figura 53 - Comparativo RTCD aos 7 e 28 dias .....	87
Figura 54 - Relação teor de fresado e cimento x MR – 28 dias .....	90
Figura 55 - Tensão atuante x Espessura – mistura 70/30 3% cimento .....	93
Figura 56 - Tensão atuante x Espessura – mistura 70/30 6% cimento .....	94
Figura 57 - Tensão atuante x Espessura – mistura 50/50 3% cimento .....	94
Figura 58 - Tensão atuante x Espessura – mistura 50/50 - 6% cimento.....	95
Figura 59 – Ensaio de granulometria por peneiramento – material fresado.....	112
Figura 60 – Ensaio de granulometria por peneiramento – pó fino .....	113
Figura 61 – Ensaio de granulometria por peneiramento – areia fina.....	114
Figura 62 – Ensaio de granulometria por peneiramento – areia industrial.....	115
Figura 63 – Ensaio de granulometria por peneiramento – brita 0,1 .....	116
Figura 64 – Ensaio de granulometria por peneiramento – filler.....	117
Figura 65 – Ensaio de granulometria por peneiramento – pedrisco 1/2” .....	118
Figura 66 – Ensaio de granulometria por peneiramento – pedrisco 3/8” .....	119

Figura 67 – Ensaio de granulometria por peneiramento – pedrisco 3/8” lascado .....	120
Figura 68 – Ensaio de granulometria por peneiramento – granilha .....	121
Figura 69 – Ensaio de compactação – material fresado .....	123
Figura 70 – Ensaio de compactação – mistura 70/30 .....	124
Figura 71 – Ensaio de compactação – mistura 50/50 .....	125
Figura 72 – Ensaio de ISC – material fresado amostra 01 .....	126
Figura 73 – Ensaio de ISC – material fresado amostra 02 .....	127
Figura 74 – Ensaio de ISC – material fresado amostra 03 .....	128
Figura 75 – Ensaio de ISC – mistura 70/30 - amostra 01 .....	129a
Figura 76 – Ensaio de ISC – mistura 70/30 - amostra 02.....	130
Figura 77 – Ensaio de ISC – mistura 70/30 - amostra 03.....	131
Figura 78 – Ensaio de ISC – mistura 50/50 - amostra 01.....	132
Figura 79 – Ensaio de ISC – mistura 50/50 - amostra 02.....	133
Figura 80 – Ensaio de ISC – mistura 50/50 - amostra 03.....	134
Figura 81 – Análise mistura 70/30 – 3% cimento .....	135
Figura 82 – Análise mistura 70/30 – 6% cimento .....	137
Figura 83 – Análise mistura 50/50 – 3% cimento .....	138
Figura 84 – Análise mistura 50/50 – 6% cimento .....	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nível de confiança de projeto $Z_r$ .....	46
Tabela 2 - Coeficientes de equivalência estrutural.....	46
Tabela 3 - Coeficientes de drenagem .....	47
Tabela 4 - Composição granulométrica da mistura reciclada.....	59
Tabela 5 - Matriz das misturas .....	59
Tabela 6 - Identificação do módulo da camada.....	72
Tabela 7 - Interface de contato .....	72
Tabela 8 - Comparativo da granulometria do material fresado com as faixas “I” e “II” - DNIT 167/2013-ES.....	75
Tabela 9 - Distribuição granulométrica dos materiais granulares pesquisados.....	77
Tabela 10 - Estabilização granulométrica do material fresado com adição de agregado virgem .....	78
Tabela 11 - Parâmetros de compactação dos materiais .....	80
Tabela 12 - Resultados do ensaio de ISC e expansão .....	81
Tabela 13 - Resultados da resistência à compressão simples nas misturas.....	83
Tabela 14 - Determinação da RTCD – 7 dias.....	85
Tabela 15 - Resultados resistência tração por compressão diametral – 7 dias.....	86
Tabela 16 - Resultados resistência tração por compressão diametral – 28 dias.....	87
Tabela 17 - Relação RTCD/RCS – 7 dias .....	88
Tabela 18 - Módulo de resiliência à compressão diametral aos 28 dias.....	89
Tabela 19 - Módulo de resiliência adotado .....	91
Tabela 20 - Coeficientes de equivalência estrutural adotados para as camadas de base cimentada....	91
Tabela 21 - Número Estrutural necessário para proteção das camadas.....	92
Tabela 22 - Estrutura preliminar do pavimento– método da AASHTO – mistura 70/30.....	92
Tabela 23 - Estrutura preliminar do pavimento– método da AASHTO – mistura 50/50.....	92
Tabela 24 - Tensões críticas e aplicação do modelo de fadiga - mistura 70/30 - 3% cimento.....	96
Tabela 25 - Tensões críticas e aplicação do modelo de fadiga - mistura 70/30 - 6% cimento.....	97
Tabela 26 - Tensões críticas e aplicação do modelo de fadiga - mistura 50/50 - 3% cimento.....	97
Tabela 27 - Tensões críticas e aplicação do modelo de fadiga - mistura 50/50 - 6% cimento.....	97
Tabela 28 - Estrutura do pavimento – método mecanístico – mistura 70/30 .....	98
Tabela 29 - Estrutura do pavimento – método mecanístico – mistura 50/50 .....	98

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ensaio de compactação e ISC de estudos realizados por outros autores.....	36
Quadro 2 - Ensaio mecânico das misturas recicladas com adição de cimento estudadas por outros autores.....	37
Quadro 3 - Características da moldagem dos corpos de prova por tipo de ensaio .....	122

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway Transportation Officials*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIPCR: *Association mondiale de la Route*

ARRA: *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*

BGTC: Brita Graduada Tratada com Cimento

CBR: *California Bearing Ratio*

CBUQ: Concreto betuminoso usinado à quente

CCR: Concreto compactado a rolo

CNT: Confederação Nacional dos Transportes

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPPE: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Da Universidade Federal do Rio de Janeiro

CPs: Corpos de prova

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DER-SP: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNER: Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ISC: Índice de Suporte Califórnia

LVDT: Linear Variable Differential Transducer

MPa: Mega Pascal

MR: Módulo de resiliência

MRD: Módulo de resiliência diametral

NAPA: *National Asphalt Pavement Association*

NBR: Normas Brasileiras Regulamentadoras

RCTD: Resistência à tração por compressão diametral

RCS: Resistência à compressão simples

SUCS: Sistema unificado de classificação de solos

TRB: *Transportation Research Board*

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFMS: Universidade Federal de Santa Maria

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Pavimentos .....</b>	<b>18</b>
2.1.1. Pavimentos Flexíveis .....	19
2.1.2. Pavimentos Rígidos .....	20
2.1.3. Pavimentos Semirrígidos.....	22
2.1.4. Pavimentos Semirrígidos Invertidos.....	23
<b>2.2. Fresagem de pavimentos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Resíduos da fresagem de pavimentos .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4. Reciclagem de pavimentos .....</b>	<b>28</b>
2.4.1. Tipos de Reciclagem.....	29
2.4.2. Outros estudos relacionados ao tema .....	31
<b>2.5. Estabilização das camadas do pavimento.....</b>	<b>41</b>
2.5.1. Estabilização granulométrica .....	41
2.5.2. Estabilização de mecânica .....	42
2.5.3. Estabilização química .....	42
<b>2.6. Dimensionamento de pavimentos.....</b>	<b>43</b>
2.6.1. Método da AASHTO .....	45
2.6.2. Método Mecanístico .....	48
2.6.3. Modelos de previsão de desempenho .....	50
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1. Amostragem .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2. Etapa 1: Caracterização dos materiais.....</b>	<b>56</b>
<b>3.3. Etapa 2: Dosagem das misturas.....</b>	<b>58</b>
<b>3.4. Etapa 3: Ensaio de compactação.....</b>	<b>60</b>
<b>3.5. Etapa 4: Ensaio de Índice de Suporte Califórnia - ISC .....</b>	<b>63</b>
<b>3.6. Etapa 5: Ensaio de resistência à compressão simples - RCS .....</b>	<b>64</b>
<b>3.7. Etapa 6: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - RTCD.....</b>	<b>65</b>
<b>3.8. Etapa 7: Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral - MR.....</b>	<b>67</b>
<b>3.9. Etapa 8: Dimensionamento das estruturas do pavimento .....</b>	<b>68</b>
3.9.1 Etapa 8.1: Pré-dimensionamento das estruturas - Método da AASHTO.....	69
3.9.2 Etapa 8.2: Análise mecânica das estruturas.....	70

3.9.2.1 Programa Everstress .....	70
3.9.2.2 Aplicação do modelo de previsão de desempenho .....	74
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1. Etapa 1 e 2: Caracterização e dosagem das misturas.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2. Etapa 3: Ensaios de compactação .....</b>	<b>79</b>
<b>4.3. Etapa 4: Ensaio de Índice de Suporte Califórnia - ISC .....</b>	<b>80</b>
<b>4.4. Etapa 5: Ensaio de resistência à compressão simples – RCS .....</b>	<b>82</b>
<b>4.5. Etapa 6: Ensaios de resistência à tração por compressão diametral - RTCD .....</b>	<b>85</b>
<b>4.6. Etapa 7: Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral - MR.....</b>	<b>89</b>
<b>4.7. Etapa 8: Dimensionamento das estruturas do pavimento .....</b>	<b>91</b>
<b>4.7.1 Etapa 8.1: Pré-dimensionamento do pavimento - Método da AASHTO .....</b>	<b>91</b>
<b>4.7.2 Etapa 8.2: Análise mecanística das estruturas .....</b>	<b>93</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>100</b>
<b>5.1. Sugestões para trabalhos futuros:.....</b>	<b>103</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE 1: Ensaios de Granulometria .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE 2: Moldagem dos corpos de prova.....</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICE 3: Ensaios de Compactação .....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE 4: Ensaio de Índice Suporte Califórnia – ISC .....</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICE 5: Resultados das Análises Mecanísticas - Programa <i>Everstress</i>.....</b>	<b>135</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é o meio mais utilizado no país, sendo responsável por 60% do escoamento das cargas, bem como pelo deslocamento de 90% dos passageiros, desempenhando um papel de grande relevância para o crescimento econômico e social, além de promover a integração entre os demais modais (CNT, 2019). Segundo o Anuário, a malha rodoviária brasileira possui em torno de 1.700.000 quilômetros de extensão, das quais apenas 13% são pavimentadas e cerca de 59% foram classificadas como regulares, ruins e péssimas.

Além da reduzida malha rodoviária pavimentada, a falta de investimentos em manutenção preventiva e conservação rotineira aliada ao excesso de cargas dos caminhões têm contribuído significativamente para precoce degradação e redução da vida útil dos pavimentos. Ainda, dados da Confederação Nacional dos Transportes (2019) indicam que no período de 2009 a 2019, a frota de veículos teve um crescimento de 74%, enquanto a malha rodoviária aumentou apenas 0,5%, evidenciando que a infraestrutura disponível não atende de forma satisfatória à crescente demanda.

Diante dessa problemática, as atividades de restauração, manutenção periódica e conservação são primordiais para garantir segurança e conforto aos usuários. Durante os processos executivos, as atividades de reabilitação de pavimentos utilizam agregados naturais e geram grandes quantidades de resíduos, que comumente são dispostos às margens das rodovias e em bota-foras irregulares, contaminando o meio e causando poluição visual, causando impactos ambientais (OLIVEIRA, 2008).

A preocupação com o descarte adequado dos resíduos gerados pelas obras de engenharia, aliados ao esgotamento dos recursos naturais, levou os especialistas ao estudo de novos métodos construtivos que possibilitem minimizar os impactos causados ao meio ambiente. Diversas técnicas têm sido pesquisadas para o melhor aproveitamento do agregado e do material oriundo de pavimentos deteriorados e tornar o resíduo gerado tecnicamente adequado para sua reutilização. Dentre as técnicas podem ser citadas: a reciclagem de pavimentos, a incorporação de resíduos em camadas de base e sub-base, como cinzas de carvão, resíduos da construção civil, borracha de pneu, areia de fundição, material fresado de revestimento asfáltico, entre outros (DNIT, 2006c).

Neste contexto, o reaproveitamento do material fresado de pavimentos através da reciclagem tem se apresentado como uma técnica bastante promissora, pois além de trazer benefícios econômicos, simplicidade e rapidez de execução, também gera vantagens do ponto de vista ambiental, com o emprego total ou parcial do material fresado, reduzindo a

quantidade de resíduos gerados pela técnica convencional de reabilitação de pavimentos (COSTA, PINTO, 2011).

A reciclagem de pavimentos permite aumentar a capacidade de suporte do pavimento existente, reduz a exploração de jazidas de agregado natural e considera o reaproveitamento dos resíduos, garantindo a sustentabilidade da obra. Ademais, atenua os problemas relacionados à disposição de resíduos e a busca por novos materiais que possam substituir as matérias-primas retiradas do meio ambiente (DNIT, 2006c). A reciclagem impacta em um menor custo final da obra devido ao menor gasto com agregados, redução da escavação, carga e transporte de materiais além de menor volume de resíduos destinados para aterros legalizados (COSTA, PINTO, 2011).

Diante deste cenário, este trabalho tem como objetivo principal estudar o reaproveitamento do material fresado de revestimentos asfálticos através da reciclagem com adição de cimento Portland e o seu desempenho em camadas de pavimentos, como uma alternativa ambientalmente correta para o emprego de resíduos gerados pelas obras rodoviárias.

Os objetivos específicos compreendem:

- Realizar ensaios de caracterização do material fresado e agregados;
- Verificar o potencial do material fresado 100% puro e das misturas sem adição de cimento na utilização como camadas de pavimentos;
- Avaliar as propriedades mecânicas das misturas com adição de cimento para uso em camadas de pavimentos;
- Estudar a influência do teor de cimento e do teor de material fresado no comportamento das misturas;
- Elaborar o pré-dimensionamento do pavimento pelo método da AASHTO;
- Realizar análises mecanísticas através do software *Everstress* e analisar a vida de fadiga através de modelo de previsão de desempenho para o dimensionamento das camadas de base das misturas recicladas com adição de cimento.

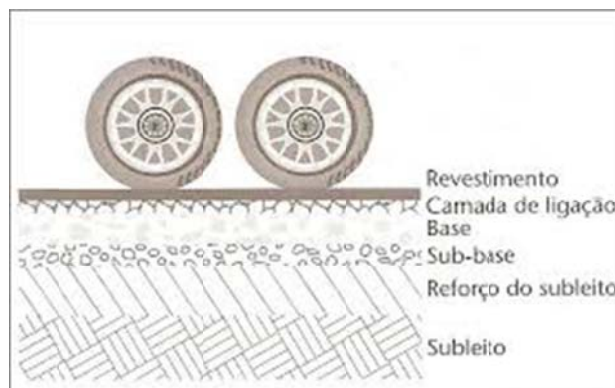
## 2. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

### 2.1. Pavimentos

De acordo com Senço (2008), pavimento é a estrutura construída sobre o terrapleno destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego ao subleito, melhorar as condições de segurança e ao conforto dos usuários e resistir ao desgaste (esforços horizontais), resultando numa superfície de rolamento com maior durabilidade.

Segundo Bernucci *et al.* (2008) e Balbo (2007), o pavimento é composto por quatro camadas principais, sendo elas: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. O subleito integra a estrutura na função de fundação, em todos os casos, exceto nos casos em que não possuem camadas de base, sub-base e/ou reforço. Para Senço (2008), as diversas camadas que constituem o pavimento são ilustradas na Figura 1 e podem ser definidas como:

Figura 1 - Camadas genéricas do pavimento



Fonte: Balbo (2007)

a) subleito: é o terreno de fundação do pavimento, composta pela camada final de terraplanagem. Em casos em que apresente tolerâncias fora de norma quanto ao acabamento ou grau de compactação, será necessário realizar a regularização do subleito. A regularização é uma operação destinada à conformação do leito estradal, dando as características geométricas necessárias ao pavimento acabado;

b) reforço do subleito: é a camada de espessura constante, determinada de acordo com o dimensionamento do pavimento e constituída de materiais provenientes de jazidas. Estes materiais deverão ter características superiores às do subleito;

c) sub-base: é a camada complementar à camada de base ou de correção. É executada após o subleito ou reforço de subleito quando houver;

d) base: é a camada de suporte estrutural que tem como objetivo receber, transmitir e distribuir os esforços verticais gerados pelo tráfego de veículos às camadas adjacentes;

e) revestimento: é a camada de rolamento, ou seja, camada que possui contato direto com as intempéries e o trânsito de veículos e está destinada a proteger as camadas inferiores da deterioração. É considerada a camada mais nobre, pois necessita de alto poder de suporte, alta resistência ao desgaste quanto à durabilidade e deve garantir conforto aos seus usuários. Além disso, deve ser tanto quanto possível impermeável, já que as demais camadas da estrutura dependerão que o revestimento infiltre a menor quantidade de água possível.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o comportamento estrutural do pavimento depende da espessura das camadas, das características mecânicas destas e do subleito, bem como da interação entre as mesmas. Sendo assim, as estruturas de pavimentos são classificadas de acordo com a rigidez do conjunto, em pavimentos flexíveis ou rígidos. Alguns autores têm empregado ainda mais uma subdivisão, representada pelos pavimentos semirrígidos.

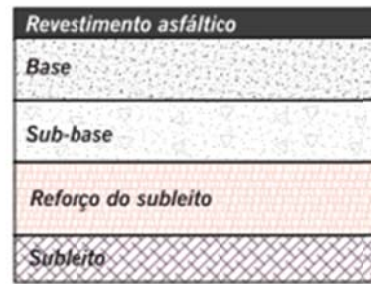
Conforme a norma NBR 7207/82 (ABNT, 1982), os pavimentos flexíveis são aqueles que apresentam revestimentos asfálticos e camada de base ou sub-base composta de agregados granulares, enquanto os pavimentos rígidos apresentam camada de revestimento de concreto de cimento Portland assentada sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária.

### 2.1.1. Pavimentos Flexíveis

De acordo com Balbo (2007), estes tipos de pavimentos se deformam com maior intensidade que os demais tipos de pavimentos ao serem submetidos às cargas oriundas do tráfego. Assim que suspenso o carregamento, o pavimento que sofreu a deformação volta à posição original.

Os pavimentos flexíveis são compostos por uma camada superficial de revestimento asfáltico, apoiada sobre camadas de base, sub-base e reforço do subleito, formadas por materiais granulares, solos ou mistura de solos, com uma fundação denominada subleito, conforme a Figura 2 (Bernucci *et al.*, 2008). Estes pavimentos são dimensionados normalmente à compressão vertical e à tração na flexão, que podem levar tanto à ocorrência de deformações permanentes, quanto ao rompimento por fadiga, respectivamente (SENÇO, 2008).

Figura 2 - Estrutura-tipo de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006b), pavimentos flexíveis são denominados aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa, nos quais, após a aplicação de carregamento ocorre a distribuição equivalente das cargas entre as mesmas. O campo de tensões encontra-se exatamente no ponto de aplicação do carregamento com pressões concentradas (Figura 3). As camadas constituintes destes pavimentos não trabalham à tração, sendo as superiores de melhor qualidade, ou seja, de maior capacidade de suporte, devido à proximidade de aplicação de cargas (BALBO, 2007).

Figura 3 - Campo de tensões pavimento flexível

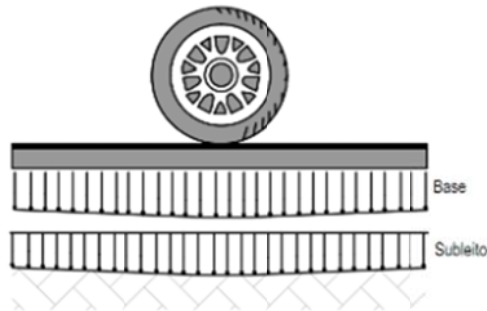


Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

### 2.1.2. Pavimentos Rígidos

Os pavimentos rígidos são também conhecidos como pavimentos de concreto e sofrem deformações muito pequenas quando comparados aos demais tipos de pavimentos. Balbo (2007) explica que estes pavimentos possuem um campo de tensões mais dispersos, com as cargas espalhadas de maneira muito semelhantes em toda a dimensão da placa de concreto, conforme Figura 4.

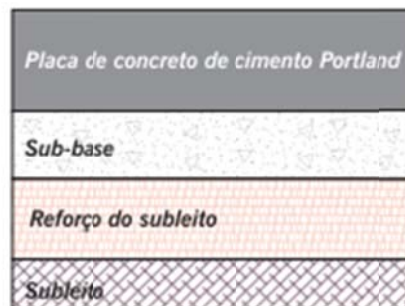
Figura 4 - Campo de tensões pavimento rígido



Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

Segundo Bernucci *et al.* (2008), são constituídos de uma camada superficial de concreto de cimento Portland apoiada sobre uma camada de material granular ou material estabilizado com cimento, denominada sub-base, que é assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito, quando necessário (Figura 5). Esse tipo de pavimento é pouco deformável e, quando são sujeitos a solicitações excessivas, rompem por tração na flexão (SENÇO, 2008).

Figura 5 - Estrutura-tipo de um pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Balbo (2007) considera que os pavimentos rígidos apresentam semelhança na distribuição do campo de tensões, sendo gradualmente dispersos em toda a placa. Desta forma, as pressões impostas ao solo de fundação são aliviadas e reduzidas.

De um modo geral, esse tipo de pavimento possui um custo elevado de implantação devido ao custo que varia de acordo com a distância de transporte do cimento Portland. Os pavimentos de concreto são mais utilizados em rodovias de alto volume de tráfego de veículos de carga, onde o emprego do mesmo se justifica. Além disso, também são empregados quando o subleito apresenta uma baixa capacidade de suporte e o uso de pavimento asfáltico somente seria possível com uma estrutura de espessuras muito elevadas (BALBO, 2007).

Para DNIT (2006b), a principal diferença entre os pavimentos flexíveis e os rígidos se dá quanto à distribuição de tensões nas camadas subjacentes. No pavimento flexível, a fundação (subleito) é a camada que absorve os esforços gerados pelo tráfego e o revestimento tem apenas a função de impermeabilizar e distribuir solicitações das cargas. Já no pavimento rígido, o revestimento tem função estrutural e absorve praticamente todas as tensões provenientes das cargas do tráfego, reduzindo a tensão imposta à fundação.

### 2.1.3. Pavimentos Semirrígidos

Para Bernucci *et al.* (2008), o pavimento semirrígido tem como definição um revestimento asfáltico assente sobre uma camada rígida, onde normalmente a base ou sub-base são compostas por materiais cimentados que resistem e são solicitados à tração.

Os pavimentos semirrígidos apresentam uma estrutura muito semelhante aos flexíveis, porém com o diferencial da adição de material estabilizado ou tratado com ligante hidráulico na camada de base. Essa característica confere um comportamento diferenciado com relação à distribuição de tensões sobre o subleito, pelo fato de que com a adição de um ligante hidráulico ao material de pavimentação, o mesmo passa a resistir aos esforços de tração na flexão, além de apresentar ganhos de resistência à compressão (BALBO, 2007).

Devido à adição de cimento na sua camada de base, os pavimentos semirrígidos apresentam um aumento de rigidez e de módulo de elasticidade. Então, passam a absorver mais esforços, diminuindo a intensidade que estes chegam nas camadas subjacentes, segundo BALBO (2007).

Balbo (2007) também explica que os pavimentos semirrígidos não apresentam comportamento flexível tampouco rígido. Dessa forma, não devem ser utilizadas camadas de concreto. Esse tipo de pavimento não apresenta níveis de rigidez como os pavimentos rígidos, mas devido à estabilização com ligantes hidráulicos podem apresentar módulo de resiliência muito próximo aos verificados em concreto, como no caso do concreto compactado com rolo.

Ainda segundo Balbo (2007), a estrutura tradicional de um pavimento semirrígido é composta por um revestimento asfáltico, uma base com material estabilizado com ligante hidráulico, uma sub-base com material não estabilizado, reforço do subleito, caso necessário, e o subleito.

#### 2.1.4. Pavimentos Semirrígidos Invertidos

O pavimento semirrígido invertido diferencia-se do semirrígido por conter a sub-base cimentada e a base granular, ao contrário do que acontece no pavimento semirrígido. É a disposição das camadas que define o comportamento mecânico deste tipo de pavimento, pois a base granular evita que o trincamento que pode ocorrer na camada cimentada se propague para o revestimento (BALBO, 2007).

### 2.2. Fresagem de pavimentos

DNER (1997) no Glossário de Termos Técnicos Rodoviários define a fresagem como o “desbastamento a quente ou a frio de superfície asfáltica, como parte de um processo de reciclagem de pavimento asfáltico”. Segundo Bonfim (2007), a fresagem de pavimentos originou dois tipos de equipamentos e processos:

- Fresagem à frio: o procedimento é realizado sem o pré-aquecimento da camada pavimento, à temperatura ambiente havendo somente liberação de energia devido ao impacto causado pelos dentes de corte no pavimento durante o processo de desbaste. Na fresagem à frio ocorre a trituração de parte dos agregados na profundidade de corte, rasa ou profunda, ocasionando alteração na granulometria do material existente na estrutura.

- Fresagem à quente: este tipo de desbaste é empregado como parte do processo de reciclagem à quente “in situ”, sendo realizado através do pré-aquecimento do revestimento asfáltico, sendo que a fresagem ocorre de forma similar à frio. No entanto, o desbaste da camada é realizado por escarificação, devido à menor resistência ao corte pelo fato de estar aquecida. A fresagem à quente não provoca uma alteração significativa da curva granulométrica dos materiais, pois gera apenas a desagregação dos mesmos, possibilitando promover a mistura com o novo material asfáltico.

Bonfim (2007) explica que a concepção dos equipamentos de fresagem ocorreu na segunda metade da década de 1970, tanto na América do Norte como na Europa, como meio de possibilitar o desbaste do pavimento em profundidades pré-estabelecidas. Destaca a fresagem como técnica recente na reabilitação de pavimentos, sendo empregada no Brasil em 1980, nas obras de restauração e conservação da Via Anchieta. Além disso, os equipamentos de fresagem podem ser classificados quanto ao seu tamanho como de pequeno, médio e grande porte (Figura 6).



Figura 6 - Equipamentos de fresagem de pequeno, médio e grande porte



Fonte: Bonfim (2007).

Bonfim (2007) descreve a fresagem como classificada de acordo com as espessuras de corte, como: superficial, rasa e profunda.

A fresagem superficial, também conhecida como de regularização é empregada somente para corrigir defeitos na superfície do revestimento asfáltico. Defeitos no pavimento como deformações plásticas, corrugações e exsudação, podem ser são tratados com a utilização da fresagem superficial para melhorar as condições de trafegabilidade da pista de rolamento (BONFIM, 2007).

A fresagem rasa apresenta uma profundidade média de corte em torno de 5 cm, atingindo geralmente as camadas de revestimento do pavimento, podendo em alguns casos, chegar à camada de ligação. Esta técnica é empregada para corrigir defeitos funcionais do pavimento e em remendos superficiais (BONFIM, 2007).

A fresagem profunda pode atingir profundidades de corte consideráveis, podendo chegar às camadas de ligação, bases e até sub-bases do pavimento. É empregado normalmente em intervenções com problemas estruturais, tanto para recompor a estrutura do pavimento como pela reciclagem e incorporação da camada de revestimento à base. É uma técnica indicada também em serviços de pequenos remendos e tapa-buracos.

Além disso, segundo Bonfim (2007), a fresagem também pode ser classificada quanto à rugosidade resultante na pista, como: padrão, fina e microfresagem (Figura 7). A rugosidade resultante da pista é obtida a partir do tipo de cilindro empregado na execução da fresagem, além da velocidade de operação.

Figura 7 - Fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem



Fonte: Adaptado de Bonfim (2007).

Fresagem padrão: resultante do cilindro originalmente ofertado nos equipamentos e apresenta como característica, a distância lateral entre os dentes de corte em torno de 15 mm. Este tipo de fresagem é utilizado geralmente no desbaste da camada visando aplicação de nova camada de revestimento (BONFIM, 2007).

Fresagem fina: foi introduzida posteriormente, e possui como característica a utilização de cilindros fresadores com a distância lateral entre os dentes de corte de 8 mm, o que ocasiona menor rugosidade na pista. Esse processo é empregado para regularização de rodovias e para garantir melhor trafegabilidade, podendo até mesmo dispensar o posterior recape da pista.

Microfresagem: decorrente da fresagem com cilindro composto por dentes de corte lateralmente posicionados, na distância de 2 a 3 mm. Neste tipo de fresagem ocorre a retirada de uma camada muito espessa de revestimento, com o intuito de ajustar o perfil longitudinal ou remoção de faixas de sinalização horizontal das pistas.

Sachet *et al.* (2013) definem os fresados como oriundos do processo de trituração de revestimentos asfálticos através de máquinas fresadoras dotadas de cilindros com pinos. Como característica básica cita a presença de filme asfáltico que envolve frações de agregados, além da formação de grumos devido à aglutinação de partículas por ligante asfáltico, não fracionadas durante a fresagem.

### 2.3. Resíduos da fresagem de pavimentos

De acordo com Brasileiro e Matos (2015), diariamente são gerados em torno de 37 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição. Os problemas ambientais causados são motivos de grande preocupação por conta dos impactos que os locais de disposição clandestinos têm sobre as cidades e a ambiente.

Grande parte dos resíduos gerados é descartada em aterros irregulares, nas margens de rios, córregos e terrenos baldios, o que pode causar a contaminação das águas e sistemas de drenagem, entupimento de bueiros, assoreamento de rios, proliferação de insetos vetores de doenças, além de poluição visual (OLIVEIRA, 2008).

Dentre os resíduos da construção e demolição, destaca-se o material fresado de revestimentos asfálticos, proveniente das obras de conservação, manutenção e restauro de rodovias (DAER, 2019). De acordo com a *National Asphalt Pavement Association* – NAPA (2018), em torno de 76,2 milhões de toneladas de fresado de pavimentos asfálticos foram gerados nos Estados Unidos no ano de 2017, com mais de 99% do resíduo reutilizado em novos pavimentos. Na Alemanha, foram produzidas 14 milhões de toneladas de fresado por ano, sendo 55% reaproveitado através da reciclagem. Na França, 7 milhões de toneladas de resíduos de material asfáltico foram gerados através da fresagem ou reabilitação de pavimentos anualmente (Brosseaud, 2011). Conforme a pesquisa delimitada pela autora, não foram encontrados dados quantitativos quanto à geração do resíduo de fresado no Brasil.

Segundo NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), os resíduos são classificados quanto aos potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública. A norma apresenta a classe para resíduos sólidos oriundos de qualquer natureza, definidos como:

- Resíduos de Classe I ou Resíduos Perigosos: são resíduos que apresentam periculosidade em razão de suas características físicas, químicas ou infectocontagiosas e podem apresentar riscos à saúde pública, possuindo como consequência a mortalidade, incidência ou aumento de doenças, ou riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerado de forma inadequada. As principais propriedades destes resíduos são: toxicidade, corrosividade, inflamabilidade, reatividade e patogenicidade.

- Resíduos de Classe II ou Não Perigosos: são todos os resíduos não considerados perigosos e são divididos em Classe II-A ou Classe II-B.

- Classe II-A ou Resíduos Não Inertes: são resíduos Perigosos ou Não Perigosos Inertes, que possuem como características serem solúveis em água, biodegradáveis e combustíveis.

- Classe II-B ou Resíduos Inertes: resíduos que em ensaios padronizados pelas normas ABNT NBR 10.007/2004 e ABNT NBR 10.006/2004, não possuem constituintes solubilizados em maiores concentrações aos padrões definidos para a potabilidade da água, exceto cor, sabor, dureza e turbidez.

A Resolução CONAMA 307/2002 estabelece diretrizes para o gerenciamento dos resíduos da construção civil com a finalidade de reduzir os impactos ambientais ocasionados pelo depósito irregular de resíduos. Segundo a Resolução, os resíduos de construção podem ser classificados como:

- CLASSE A – São resíduos que podem ser reaproveitados ou reciclados para produção de agregados, tais como de reformas, construção, demolição e obras de pavimentação;
- CLASSE B – São resíduos que podem ser reciclados para outras destinações, como: o plástico, papel, papelão, madeira, vidro, metais entre outros;
- CLASSE C – São os resíduos economicamente inviáveis devido à falta de tecnologias que permitam a sua reciclagem ou reutilização, como exemplo o gesso.
- CLASSE D – São resíduos considerados perigosos, como: solventes, óleos, tintas, bem como contaminados gerados através de reparos e demolições de instalações industriais, clínicas radiológicas e outros.

Segundo DAER (2019), o material fresado de pavimentos é classificado pela Norma ABNT NBR 10004:2004 como Classe II-B, resíduo não perigoso e inerte. Além disso, é considerado um resíduo da construção civil, que de acordo com a Resolução CONAMA nº 307/2002, pode ser caracterizado como Classe A e definido como resíduos recicláveis ou reutilizáveis.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, através da Resolução CONAMA nº 448/2012, estabelece a destinação correta para os resíduos da construção civil, sendo de caráter obrigatório o encaminhamento para depósitos autorizados ou projetos de reutilização.

DAER (2019) estabelece diretrizes para a gestão do fresado proveniente das obras de reabilitação do pavimento como forma de diminuir ou suprimir os impactos ambientais gerados pela geração do resíduo, que pode ser reutilizado. As diretrizes propostas têm como objetivo o atendimento à legislação ambiental e visa a utilização de práticas sustentáveis nas obras rodoviárias.

Ribeiro (2006) descreve que o aproveitamento do resíduo na engenharia pode representar a preservação do meio ambiente, além de economia e durabilidade, sendo que uma das formas mais simples de reciclagem do entulho é a através do emprego em camadas do pavimento, podendo misturar os resíduos com outros materiais.

## 2.4. Reciclagem de pavimentos

Reciclagem de pavimentos, segundo Bernucci *et al.* (2008), é a técnica de reabilitação de pavimentos caracterizada pela reutilização de misturas asfálticas deterioradas em novas misturas, através do aproveitamento dos ligantes e agregados resultantes da fresagem, no qual podem ser adicionados agentes rejuvenescedores, como cimento Portland, emulsão asfáltica, espuma de asfalto ou outro aditivo químico. No processo de reciclagem, a camada danificada é removida através da fresagem, total ou parcialmente, sendo que o material originado é reaproveitado na nova camada a ser executada.

A *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* – ARRA (1997) relata o uso de reciclagem a frio desde a década de 1900, sendo que o primeiro caso de reciclagem à quente *in situ* documentado foi na década de 1930. Para Bonfim (2007), com a escassez de materiais asfálticos e a crise econômica ocasionada devido à crise do petróleo na década de 70, surgiram as técnicas para reutilização dos materiais obtidos da fresagem de pavimentos deficientes através da reciclagem, com o intuito de reabilitar as condições dos pavimentos em níveis satisfatórios, do ponto de vista técnico e econômico.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006c) define a reciclagem dos pavimentos como uma solução para muitos problemas encontrados nos grandes centros urbanos, além de oferecer benefícios com relação as técnicas convencionais que utilizam grandes quantidades agregados virgens em seus processos. Dentre as vantagens da reciclagem podem ser citadas: rapidez executiva, conservação de agregados e ligantes, melhoria das condições geométricas da pista de rolamento, conservação da energia, além da preservação do meio ambiente e de otimizar os custos de implantação. Além disso, devido às restrições impostas pela legislação ambiental e a valorização dos locais de ocorrências, a diminuição da demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte jazidas são benefícios de grande importância.

De acordo com a ARRA (1997), a reciclagem de um pavimento reduz os problemas com a disposição de resíduos provenientes dos processos de restauração, além de gerar uma economia de custo, recursos naturais e energia através do processo. Ainda, as espessuras das camadas do pavimento bem como a geometria existente podem ser mantidas durante o processo construtivo, devido ao reaproveitamento dos materiais.

David (2006) acrescenta que as leis ambientais preveem reduções rigorosas na emissão de gases poluentes, no descarte correto de resíduos e na exploração de materiais não-

renováveis, fortalecendo, assim, a justificativa para o uso da reciclagem de pavimentos no meio rodoviário.

Como desvantagens da reciclagem de pavimentos podem ser citadas: a necessidade de mão de obra especializada, a dificuldade das máquinas em acessar obras mais distantes dos centros urbanos, além de considerar necessária a análise econômica para realização dos serviços em diferentes regiões, pelo fato de cada local possuir as suas particularidades (COSTA; PINTO, 2011).

#### 2.4.1. Tipos de Reciclagem

A ARRA (1997) definiu os tipos de reciclagem em cinco categorias distintas, de acordo com o tipo de execução, conforme segue.

##### 2.4.1.1 Reciclagem a frio *in situ*

Nesta técnica de reciclagem, o material existente no pavimento é reutilizado no próprio local e permite uma execução mais rápida e econômica em relação ao processo em usina, devido à redução ou exclusão significativa de transporte de material. É composta por um conjunto de máquinas que trabalham em sequência compondo um “trem” de reciclagem que realiza a fresagem do material. As recicladoras possuem um cilindro no qual, à medida que avançam, o material fresado é pulverizado e suspenso até a câmara de mistura. (WIRTGEN, 2012).

O material oriundo da fresagem é misturado com o agente estabilizante (cimento, cal ou material asfáltico) e devolvido em uma só passada (DNIT, 2006c). A mistura é aplicada no local fresado, compactada com rolo, nivelada e, por fim, compactada por rolos vibratórios e pneumáticos, enquanto recebe aplicação de água (WIRTGEN, 2012).

##### 2.4.1.2 Reciclagem a frio em usina

A reciclagem a frio em usina ocorre quando após a remoção do material do pavimento, o mesmo é transportado para uma usina misturadora. O processo se inicia através da fresagem da camada de revestimento asfáltico que é então encaminhada para a usina de processamento, onde o material é reciclado e, posteriormente, levado de volta ao local para aplicação, nivelamento e compactação (DNIT, 2006c).

Apesar desta técnica não ser a mais econômica devido aos custos adicionais com transporte de material e maior prazo de execução do serviço, a reciclagem a frio em usina possibilita maior controle na composição das misturas, já que o produto final é gerado da combinação de agregados em proporções precisas, previamente selecionados (WIRTGEN, 2012).

Além disso, Wirtgen (2012) descreve esta técnica como sendo muito eficiente em casos onde o projeto prevê execução de camadas inferiores à camada reciclada; no caso de utilização de material fresado estocado proveniente de outras obras; quando o material constituinte do pavimento for muito variável e for necessário processo de seleção, ou o material for muito duro não permitindo a trituração.

#### 2.4.1.3 Reciclagem à quente em usina

É o processo de reciclagem onde o pavimento degradado é removido por fresagem, sendo transportado para a usina onde será realizada a produção da mistura reciclada. Na técnica de reciclagem à quente, o pavimento deteriorado é combinado com novos agregados e ligante asfáltico com acréscimo de calor para gerar a mistura reciclada. Para esta técnica de reciclagem podem ser utilizadas usinas do tipo intermitente (gravimétrica) ou usinas a tambor (*drum-mixer*). Após a produção, a mistura é lançada e compactada através da adoção de equipamentos convencionais, semelhante à execução de concreto asfáltico convencional (DNIT, 2006c).

#### 2.4.1.4 Reciclagem à quente in situ

Consiste no amolecimento através do aquecimento com calor da camada de revestimento existente, seguido da escarificação de parte ou totalidade do material asfáltico. O material é misturado aos novos agregados e ligantes asfáltico aquecidos. Os materiais são misturados e distribuídos no próprio local com auxílio de uma pavimentadora tradicional, sem necessidade de usina de mistura. Neste tipo de reciclagem, não é necessário remover o material original do local da obra (DNIT, 2006c).

Este método de reciclagem tem como objetivo principal reabilitar as características funcionais do pavimento apenas na camada de desgaste, não pode ser utilizado em casos onde o pavimento contenha patologias nas camadas estruturais (CUNHA, 2010).

#### 2.4.1.5 Reciclagem profunda

A reciclagem profunda se trata de um processo de reabilitação realizado sem a adição de calor e contempla a remoção total do revestimento asfáltico com frações pré-determinadas das camadas da base, sub-base e/ou subleito. Estes materiais são triturados e misturados, podendo ser acrescidos de agregados virgens e/ou aditivos estabilizantes, com a finalidade de formar um material de base homogênea. Normalmente, estes aditivos estabilizantes aumentam a resistência mecânica e a resistência estrutural do pavimento, suportando a capacidade de carga prevista (ARRA, 1997).

Os aditivos mais utilizados na reciclagem profunda são os cloretos de cálcio, cimento Portland, cinzas volantes e a cal. De acordo com Aranha (2013), a adição de cimento resulta em menores camadas de revestimento asfáltico e uma camada de base menos sensível à água do que a base original, resultando em menores manutenções.

#### 2.4.2. Outros estudos relacionados ao tema

Neste capítulo, são abordados estudos realizados por outros autores referentes ao reaproveitamento de material fresado através da reciclagem com e sem adição de cimento e os resultados obtidos.

A pesquisa realizada por Gusmão (2008) teve como objetivo avaliar a evolução da resistência à compressão simples e tração por compressão diametral para tempos de cura úmida de 1, 3 e 28 dias, através da simulação em laboratório da reciclagem de pavimento com adição de cimento. As dosagens das misturas foram compostas de brita graduada mais material fresado nos percentuais de 40%, 50% e 60%. A energia de compactação utilizada foi a intermediária e os teor de cimento de 3% e 5% da massa seca. Conforme descrito pela autora, a maior resistência foi atingida para misturas com maior percentual de brita graduada, assim como para maiores tempos de cura úmida, obtendo a resistência máxima de 2,11 MPa aos 28 dias.

Além disso, Gusmão (2008) apresentou em seu trabalho uma metodologia para dosagem de misturas recicladas de material fresado de revestimentos asfálticos com adição de cimento Portland e ressaltou como uma das vantagens da utilização da reciclagem de pavimentos a sustentabilidade.

Paiva e Oliveira (2009) analisaram os diversos tipos de cimento Portland a serem utilizados na reciclagem de pavimentos utilizando 40% de material fresado. Em seu trabalho,



descrevem que a resistência à compressão simples não deve ser o principal critério para a escolha do tipo de cimento. Maiores resistências são responsáveis pelo aumento do calor de hidratação e redução do tempo de pega. Para os autores, a utilização de cimentos que possuam menores concentrações de clínquer e gesso, como o CP III ou o cimento composto tipo CP II, são mais adequados para diminuir os efeitos da retração.

De acordo com *Association Mondiale de la Route* (2003), os cimentos do tipo composto e de classe de resistência intermediária são os mais indicados na reciclagem de pavimentos. Paiva e Oliveira (2009) também recomendam estes tipos de cimentos para reciclagem de pavimentos, por apresentarem baixo calor de hidratação e trabalhabilidade adequada à execução.

Segundo a norma ABNT NBR 11.578/2018, os cimentos são denominados compostos por apresentar a adição de outros materiais na sua composição. O CP II E é um cimento composto por clínquer, sulfato de cálcio, escória granulada de alto forno e material carbonático. Quanto à resistência à compressão simples aos 28 dias, os cimentos compostos variam de 25, 32 e 40 MPa e são classificados como baixa, intermediária e alta resistência respectivamente.

Trichês e Santos (2011) avaliaram o desempenho da reciclagem com adição de cimento na restauração da rodovia SC-303. O segmento estudado, entre Joaçaba e Capinzal, apresentava comprometimento das camadas de revestimento, base e acostamentos. A reciclagem foi executada entre 2006 e 2007, numa extensão de 30 km e contemplou o material obtido da trituração de cerca de 8 cm do revestimento e 12 cm da base, além de adição de 15% de agregado virgem para ajuste granulométrico e 3% de cimento. Os ensaios de compactação, umidade ótima e resistência mecânica foram realizados com a obra em execução com o intuito de acompanhar o desempenho da reciclagem no ano de abertura da via ao tráfego e ao longo do tempo. De acordo com os modelos adotados e resultados verificados em campo, os autores esperam que a reabilitação realizada na rodovia suporte o tráfego previsto para vida útil de projeto.

Silva (2012) relata a utilização de fresado de misturas constituídas de 70% de material fresado e 30% de pó de pedra e de 30% de material fresado e 70% de pó de pedra, com o intuito de enquadrar os materiais na faixa C da DNER-ES 303/97 para utilização em camada de base de pavimento. Os valores verificados para o Índice de Suporte Califórnia - ISC à energia modificada foram de 30,29% para o material fresado puro, 34,27% para a mistura 70/30 e 67,34% para a mistura 30/70, levando-o a concluir que com o aumento do teor de pó-

de-pedra na mistura, obtêm-se maiores percentuais de ISC, assim como maior a massa específica aparente seca.

Silva (2012) propôs ainda a execução da mistura 70/30 em rua lateral da rodovia BR-285, no município de Bozano, onde realizou o acompanhamento e controle tecnológico de sua pesquisa na pista experimental, concluindo que a aproveitamento do resíduo de fresado trata-se de uma boa alternativa para execução de pavimentos com baixos volumes de tráfego.

Paiva e Oliveira (2013) sugeriram a utilização de baixos teores de cimento a fim de reduzir o aparecimento de trincas por retração, além de futuras trincas devido à fadiga do material reciclado. A mistura estudada foi composta de 40% de fresado e incorporada à base de solo cimento. O percentual de cimento fixado foi de 3%, que segundo os autores, são empregados na maior parte das obras de reciclagem no país. Na pesquisa, reforçaram a prerrogativa de que para minimizar os efeitos da rigidez e retração, baixos teores de cimento devem ser utilizados. Os autores concluíram no estudo que para que maiores resistências sejam alcançadas para baixos teores, a granulometria da mistura reciclada deve ser bem graduada, com menor índice de vazios entre os grãos e o cimento após a cura e compactação. A resistência à compressão mínima encontrada foi de 2,27 MPa aos 3 dias e a máxima de 3,53 MPa aos 28 dias de cura úmida.

Specht *et al.* (2013) estudaram a utilização de material fresado com adição de cimento para execução de rua lateral na rodovia BR-290, município de Eldorado do Sul. A dosagem da mistura foi realizada para 70% de fresado, 15% de brita ¾” e 15% de pó-de-pedra e teores de cimento de 2 a 5%. A estabilização granulométrica foi obtida para a faixa “A” do DNIT. Os ensaios de ISC resultaram em 56% para o fresado e de 95% para a mistura sem adição de cimento, demonstrando o potencial de aproveitamento destes materiais na pavimentação. Conforme a especificação de serviço DNIT 141/2010 – ES, para utilização do material para bases de pavimento, o valor de ISC deve ser maior que 80%. Para as misturas com adição de cimento, Specht *et al.* (2013) realizaram ensaios de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias de cura úmida, onde foi adotado o teor de cimento de 4,86%, cuja RCS resultou superior a 2,1 MPa, confirmando a utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Specht *et al.* (2013) relataram ainda, a execução de seções teste na rua lateral da BR-290, cujo desempenho foi monitorado e não apresentou nenhuma patologia até o término dos estudos.

A pesquisa realizada por Pires (2014) abordou a estabilização granulométrica e química do material fresado das rodovias BR-290 e ERS-509 através da adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz. A estabilização granulométrica foi realizada para um percentual de

70% de material fresado e 30% de agregado natural. A estabilização química foi realizada para os ensaios de resistências à compressão simples para os teores de 3, 4, 5 e 6% de cimento, para cura úmida de 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias. Pires (2014) utilizou os resultados obtidos na pesquisa iniciada junto a Specht *et al.* (2013) e deu continuidade aos estudos. Os valores obtidos no ensaio de ISC demonstraram uma capacidade de suporte da mistura da BR-290 de 95%, enquanto para a ERS-569 de 68%, levando o autor a concluir a viabilidade técnica da utilização de material reciclado em bases e sub-bases de pavimentos, visto que o ISC mínimo para bases para tráfego leve é de 60%, conforme DNIT 141/2010 – ES. Nos ensaios de resistência à compressão simples foram determinados os teores de cimento para resistência à compressão de 2,1MPa aos 28 dias. A partir destes teores, foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência, com substituição de percentual de cimento em massa por cinza de casca de arroz, nos percentuais de 15, 30 e 50%. A análise dos resultados laboratoriais tornou comprovada a utilização de material fresado em camadas de pavimentos.

Ely (2014) enfatizou a energia de compactação utilizada na reciclagem de pavimentos com adição de cimento para mistura de material fresado e brita graduada. Em seu trabalho, verificou a influência da energia intermediária e modificada no comportamento das misturas com 70% de fresado, estabilização granulométrica com brita graduada e adição de 4% de cimento. Aos 7 dias de cura, obteve valores de resistência à compressão simples de 1,90MPa para a energia intermediária e 2,55 MPa para energia modificada, enquanto para a resistência à tração por compressão diametral, resultou em 0,26 MPa para ambas energias. Deste modo, observou-se que a energia de compactação influenciou na resistência à compressão das misturas, enquanto os valores de resistência à tração não se alteraram.

Ainda, Ely (2014) comparou os resultados de seu trabalho com Fedrigo (2014), que utilizou percentuais de 20% e 50% de fresado para o mesmo teor de cimento de 4%, levando o autor a concluir que quanto menor o percentual de fresado, maior a resistência e rigidez da mistura.

Fedrigo (2015) propôs um método de dosagem para reciclagem de pavimentos com adição de cimento, no qual desenvolveu um programa experimental onde analisou as propriedades mecânicas das misturas compostas de material fresado, brita graduada e cimento, com variação do percentual de fresado em 20% e 50%, teor de cimento de 2%, 4% e 6%, energia de compactação Intermediária e Modificada e o tempo de cura dos corpos de prova de 3, 7 e 14 dias. Em seus ensaios, verificou que a resistência da mistura aumenta com o tempo de cura, com a energia de compactação modificada e com maior adição de cimento.

A maior resistência atingida foi de 6,08 MPa aos 14 dias para a mistura com 20% de fresado, energia modificada e 4% de cimento, enquanto a menor resistência verificada foi de 1,61 MPa aos 3 dias para a mistura com 50% de fresado, com adição de 2% de cimento à energia intermediária e 4% de cimento para energia modificada.

Fedrico (2015) recomenda que sejam utilizados teores de cimento de até 4%, pois maiores teores acarretam em maior resistência e rigidez, o que pode tornar as misturas bastante frágeis podendo levar a ruptura, além de problemas com retração.

Silva (2016) fundamentou sua pesquisa na análise laboratorial das misturas de material fresado, pó de pedra e cimento com o intuito de empregar os materiais em camadas de base e sub-base de pavimentos. Utilizou em sua análise as misturas nas proporções de 100% fresado, 80% fresado e 20% pó de pedra, 60% fresado e 40% pó de pedra, 40% fresado e 60% pó de pedra, 20% fresado e 80% pó de pedra e 0% fresado e 100% pó de pedra. A energia de compactação aplicada foi equivalente à modificada. Foram realizados ensaios de granulometria, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral. Como conclusão, descreve as resistências mecânicas verificadas nos ensaios como superiores às definidas nas normativas brasileiras e destaca o potencial de reaproveitamento do material fresado como camada de base e sub-base de pavimentos, além de se tratar de uma solução ambientalmente correta em razão da utilização de resíduo rodoviário reduzindo o uso de novos agregados. O valor máximo de RCS obtida foi de 4,86 MPa aos 28 dias, enquanto a RTCD foi de 0,90 MPa para as misturas com 40% de fresado e adição de 6% de cimento, para energia modificada.

Hermes *et al.* (2016) propuseram a utilização do material fresado de revestimento asfáltico misturado com pó de pedra na execução de pavimento flexível de faixa adicional na BR 386/RS e realizaram o acompanhamento no período de 9 (nove) meses. Ao material fresado estudado foi misturado 30% de pó de pedra, com o objetivo de enquadrar a granulometria na faixa C do DNIT. Os resultados obtidos revelaram um ISC de 128%. Em seu estudo, ressaltam o comportamento estrutural adequado do material fresado não só na construção de faixas adicionais, mas também na reconstrução de pavimentos.

Molz (2017) estudou a viabilidade da utilização do material fresado da rodovia RSC-287 estabilizado granulometricamente com pó-de-pedra em bases de pavimentos, nas proporções de 70% e 30%, respectivamente. A granulometria resultante do fresado puro e da mistura não obtiveram enquadramento nas faixas do DNIT, porém ficaram mais próximas à faixa C. O ensaio de ISC resultou em 21,98%.

Segundo Molz (2017), os ensaios de módulo de resiliência, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral não obtiveram resultados, devido ao material não apresentar propriedades aglutinantes e ter se fragmentado durante a retirada do molde. Por fim, com o valor do ISC obtido, citou a utilização do material em camadas de sub-base, reforço e regularização de subleito. Como sugestão de trabalhos futuros, a autora indica a adição de outros materiais com propriedades aglutinantes, como exemplo o cimento, para aumento da resistência da mistura.

Os resultados dos estudos acima descritos foram compilados e estão apresentados a seguir. A Quadro 1 apresenta os valores verificados para os ensaios de compactação e ISC. Já o Quadro 2 exprime os resultados obtidos nos ensaios mecânicos para as misturas recicladas de material fresado com a adição de cimento. Alguns autores não foram apresentados nas tabelas a seguir devido aos resultados do ensaio não terem sido citados em seu estudo ou pelo fato dos mesmos não serem objeto da pesquisa.

Quadro 1 - Ensaio de compactação e ISC de estudos realizados por outros autores

Autor	Rodovia	Fresado (%)	Cimento (%)	Energia	$\gamma$ máxima (g/cm <sup>3</sup> )	w ótima (%)	ISC (%)
Gusmão (2008)	-	40	3	Intermediária	2,009	8,5	-
		50	3		1,990	7,4	-
		60	3		1,997	6,8	-
Trichês e Santos (2011)	SC-303	40	-	Modificada	2,210	7,2	-
Silva (2012)	BR-158	100	-	Modificada	2,115	8,18	30,29
		70			2,221	7,54	38,79
		30			2,344	7,56	64,46
Specht <i>et al.</i> (2013) e Pires (2014)	BR-290	100	-	Modificada	2,023	7,2	56,00
		70	-		2,092	8,2	95,00
Pires (2014)	RS-509	100	-	Modificada	1,827	9,2	21,00
		70	-		1,963	8,8	68,00
Ely (2014)	-	70	-	Intermediária	2,000	9,0	-
				Modificada	2,095	8,4	-
Fedrigo (2015)	RSC-453	20	2	Modificada	2,075	8,2	-
			4		2,110	7,6	-
			4	Intermediária	2,030	9,5	-
			6		2,080	9,0	-

Autor	Rodovia	Fresado (%)	Cimento (%)	Energia	$\gamma$ máxima (g/cm <sup>3</sup> )	w ótima (%)	ISC (%)
Fedrigo (2015)	RSC-453	50	2	Modificada	2,060	8,0	-
			4		2,070	7,1	-
			4	Intermediária	2,025	9,1	-
			6		2,070	8,0	-
Silva (2016)	BR-287	20	-	Modificada	2,115	8,5	-
		40			2,105	7,6	-
		60			2,084	8,8	-
		80			2,054	8,2	-
		100			1,980	8,3	-
Hermes <i>et al.</i> (2016)	BR-386	70	-	Modificada	1,983	8,20	128,00
Molz (2017)	BR-287	70	-	Intermediária	2,030	9,9	21,98

Fonte: Elaboração Própria (2020).

Quadro 2 - Ensaio mecânicos das misturas recicladas com adição de cimento estudadas por outros autores

Autor	Rodovia	Fresado (%)	Cimento (%)	Energia	Cura (dias)	RCS (MPa)	RTCD (MPa)	MR (MPa)
Gusmão (2008)	-	40	3	Intermediária	1	0,95	-	-
					3	1,11	0,14	-
					28	2,11	0,42	-
		50	3		1	0,68	0,06	-
					3	1,00	0,12	-
					28	2,09	0,39	-
		60	3		1	0,49	0,04	-
					3	1,00	0,12	-
28	2,09	0,38	-					
Paiva e Oliveira (2009)	-	40	Diversos	Intermediária	3	2,27	-	-
					7	2,60	-	-
					28	3,53	-	-
Minguela (2011)	SA-801	33	2,5	Modificada	7	1,31	-	-
			3,5	Modificada	7	2,61	0,19	-
					28	3,17	0,26	-
					90	3,96	0,39	-
4,5	Modificada	7	3,23	-	-			
Trichês e Santos (2011)	SC-303	40	3	Modificada	3	0,97	0,24	-
					7	1,63	0,34	-
			3,5		28	2,49	0,50	-
					7	2,06	0,36	-
			4		28	3,31	0,63	-
					7	2,85	0,48	-

Autor	Rodovia	Fresado (%)	Cimento (%)	Energia	Cura (dias)	RCS (MPa)	RTCD (MPa)	MR (MPa)	
Trichês e Santos (2011)	SC-303	40	4,5	Modificada	7	3,33	0,52	-	
					28	4,84	0,82	-	
Paiva e Oliveira (2013)	-	30	3	Modificada	7	2,47	0,22	-	
Specht <i>et al.</i> (2013) e Pires (2014)	BR-290/RS	70	2	Modificada	7	0,38	-	-	
					28	0,40	-	-	
			3		7	0,61	-	-	
					28	0,94	-	-	
			4		7	1,09	-	-	
					28	1,38	-	-	
			5		7	1,83	-	-	
					28	2,07	-	-	
Pires (2014)	RS-509	70	3	Modificada	7	0,75	-	-	
					28	1,11	-	-	
			4		7	0,93	-	-	
					28	1,53	-	-	
			5		7	1,16	-	-	
					28	2,13	-	-	
			5,37		7	-	0,22	6.122	
					28	-	0,34	7.070	
6	7	1,87	-	-					
	28	2,27	-	-					
Ely (2014)	-	70	4	Intermediária	3	1,29	0,19	3.663	
					7	1,90	0,26	6.298	
					14	2,08	0,28	7.892	
				Modificada	3	2,03	0,21	4.865	
					7	2,54	0,26	7.432	
					14	2,72	0,45	8.420	
Fedrigo (2015)	RSC-453	20	2	Modificada	3	2,33	0,48	15.019	
					7	2,65	0,48	16.364	
					14	3,14	0,70	20.012	
			4		3	3,35	0,78	18.902	
					7	4,77	0,90	19.727	
					14	6,08	1,00	25.719	
			4	Intermediária	3	1,85	0,29	12.571	
					7	3,03	0,47	16.231	
					14	3,68	0,82	18.751	
					6	3	4,51	0,66	18.353
						7	5,65	0,89	23.208
						14	5,78	1,11	24.842

Autor	Rodovia	Fresado (%)	Cimento (%)	Energia	Cura (dias)	RCS (MPa)	RTCD (MPa)	MR (MPa)
Fedrigo (2015)	RSC-453	50	2	Modificada	3	1,61	0,34	10.873
					7	2,63	0,42	13.187
					14	2,65	0,51	18.198
			4		3	2,61	0,65	14.623
					7	4,43	0,74	18.528
					14	4,83	0,79	21.447
		4	Intermediária	3	1,61	0,30	10.390	
				7	2,83	0,51	13.548	
				14	3,28	0,54	18.756	
				6	3	4,06	0,60	16.787
					7	4,98	1,02	20.597
					14	5,15	1,07	21.062
Silva (2016)	BR-287/RS	20	6	Modificada	7	3,65	0,56	-
					14	4,24	0,67	-
					28	4,86	0,84	-
		40			7	3,75	0,60	-
					14	4,39	0,65	-
					28	4,86	0,90	-
		60			7	2,10	0,32	-
					14	2,72	0,38	-
					28	2,88	0,45	-
		80			7	2,88	0,25	-
					14	3,79	0,32	-
					28	4,06	0,40	-

Fonte: Adaptado de Fedrigo (2020).

Pereira (2017) descreve algumas particularidades referentes à utilização de materiais fresados de pavimentos internacionalmente. Nos EUA, alguns estados permitem emprego de 100% de material fresado em camadas de bases e sub-bases, outros restringem em no máximo 50%, no entanto alguns estados não permitem o uso do material nessas camadas. Já na França e na Alemanha o percentual de utilização é no máximo 30%. A Grã-Bretanha estabeleceu o limite de 50% de material fresado, enquanto a Holanda não admite o emprego em bases e sub-bases. A seguir descreve-se alguns estudos realizados em outros países.

Cooley (2005) em sua dissertação de mestrado analisou a reutilização de fresado asfáltico na reciclagem profunda de pavimentos. A pesquisa teve como objetivo avaliar a influência do asfalto fresado nas propriedades mecânicas das misturas recicladas com materiais típicos do norte de Utah nos Estados Unidos. Foram utilizados percentuais de 0, 25, 50, 75 e 100% de materiais fresados na análise experimental. Os ensaios de laboratório



consistiram na caracterização dos materiais, ensaios de compactação, resistência, rigidez e suscetibilidade à umidade para cada mistura. As umidades ótimas variaram de 5,62 a 7,08%.

Os resultados obtidos para o ISC indicaram que os valores das resistências diminuíram à medida que maiores percentuais de fresado foram utilizados. Conforme relatado pelo autor, a adição de 25% de fresado nas misturas ocasionou o decréscimo da resistência se comparado aos materiais sem adição de fresado, além de verificar a diminuição dos percentuais de ISC de 13 a 15% a cada aumento de 25% no teor de fresado. Quanto à rigidez, Cooley (2005) observou uma redução nas misturas sem adição de fresado e teor de 25% de fresado, seguida de um aumento constante da rigidez à medida que os percentuais de fresado nas misturas foram aumentados. No entanto, após um período de 72 horas de secagem, devido às amostras terem sido expostas ao calor dentro da estufa gerando a aglutinação das partículas do fresado, ocorreu um aumento na rigidez para maiores teores de fresado e diminuição da rigidez para misturas com 25% de fresado e sem adição deste material.

Miguela (2011) selecionou a rodovia SA-801, na Espanha, para estudar o comportamento do material reciclado. O estudo foi realizado em laboratório por um período de 3 (três) anos, com o objetivo de obter as relações entre resistência à compressão simples e a resistência à tração e flexão aos 7, 28 e 90 dias, além de estudar a fadiga da mistura reciclada com cimento nos percentuais de 2,5, 3,5 e 4,5. A partir dos resultados, desenvolveu modelos de previsão de desempenho e propôs um catálogo de seções estruturais a serem utilizadas pelos projetistas em camadas recicladas com cimento.

Taha *et al.* (2012) estudaram as misturas de material fresado e agregados virgens estabilizadas com cimento. Realizaram ensaios laboratoriais de compactação e resistência à compressão simples para as misturas de material fresado e agregado: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 e 0/100%. Às misturas foram adicionados 0, 3, 5 e 7% de cimento Portland tipo I para períodos de cura de 3, 7 e 28 dias. Os resultados sugerem que resistência, teor de umidade e massa específica aparente seca máxima do material fresado normalmente aumentam com o acréscimo de agregados e cimento, além de resultar em maiores resistências para maiores tempos de cura. Além disso, os pesquisadores concluem no estudo que a utilização do material fresado 100% puro não é aconselhado para camadas de base de pavimentos e descrevem as misturas de fresado e agregados com cimento como uma alternativa viável na construção de rodovias.

Yuan *et al.* (2012) avaliaram a viabilidade da utilização de altos teores de material fresado e agregados e sua aplicação em bases de pavimentos. As composições das misturas foram definidas com 100%, 75% e 50% de fresado e adição de 0%, 2%, 4% e 6% de cimento.

No total foram ensaiadas oitenta misturas de materiais com e sem cimento, sendo que os materiais foram coletados no Texas. Os resultados demonstraram que o percentual de fresado e os agregados mais finos, bem como o teor de cimento tiveram influência significativa nas propriedades das misturas. O teor de cimento ideal obtido no estudo foi de 4%, 3% e 2% para misturas de 100%, 75% e 50%, respectivamente, para resistência à compressão simples de 300 psi (2,07 MPa), conforme recomenda o Departamento de Transportes do Texas. Além disso, realizaram ensaios para analisar o desempenho e a durabilidade ao longo do tempo, como módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral.

## **2.5. Estabilização das camadas do pavimento**

Na pavimentação, a estabilização de um solo tem como objetivo aumentar a capacidade de resistir e suportar os carregamentos e esforços do tráfego e também às ações erosivas de agentes naturais. A estabilização pode ocorrer através de processos naturais e artificiais, resultando na diminuição do tempo de execução da obra e economia ao empreendimento (MARQUES, 2009).

A estabilização é empregada nas camadas de base e sub-base de pavimentos, material granular, misturado ou não com solo. Na pavimentação, a importância da estabilização de solos é evidente, visto que a maioria das obras deste tipo no país utilizam camadas granulares (BALBO, 2007).

De acordo com Cordeiro (2007), os principais tipos de estabilização são: a granulométrica, a mecânica e a química, definidas conforme a seguir.

### *2.5.1. Estabilização granulométrica*

A estabilização granulométrica pode ser definida como a utilização de um material ou uma mistura de materiais de forma que os mesmos se enquadrem dentro da especificação desejada (MARQUES, 2009).

De acordo com Medina (2007), estabilização granulométrica é a mistura de dois ou mais materiais, e sua posterior compactação. Com esse processo, procura-se obter uma mistura densamente graduada e de fração fina plástica limitada.

Yoder e Witczak (1975) afirmam que a estabilidade de misturas depende da distribuição granulométrica, de maneira que o excesso ou ausência de finos influencie no desempenho da mistura. O melhor desempenho se encontra na composição formada de finos em quantidade

suficiente para que os vazios possam ser preenchidos, proporcionando um melhor embricamento entre os grãos, gerando assim um aumento significativo da resistência ao cisalhamento da mistura.

### *2.5.2. Estabilização de mecânica*

A estabilização mecânica é considerada o método mais antigo utilizado nas construções de estradas. Ocorre por meio de uma energia externa de compactação que ao ser aplicado no solo reduz o número de vazios, alterando as condições de compressibilidade e permeabilidade do solo, aumentando a resistência aos esforços externos (MEDINA; MOTTA, 2015).

As camadas com materiais onde não há estabilização com ligante hidráulico ou asfáltico são camadas que apenas recebem estabilização mecânica por efeito de compressão e adensamento dos materiais constituintes. A correta compactação do material é essencial na utilização de pedras britadas nas camadas de pavimento, pois permitirá uma elevada resistência aos esforços verticais provocados pela ação das cargas. A resistência ao cisalhamento é proporcionada pelo entrosamento entre às partículas do agregado, que melhoram à proporção em que o esforço aumenta (BALBO, 2007).

### *2.5.3. Estabilização química*

A estabilização química quando utilizada em solos granulares tem a função de melhoria da resistência ao cisalhamento, causado pelo atrito gerado pelo contato das superfícies das partículas, com a adição de quantidades menores de ligantes nas interfaces de contato dos grãos (MARQUES, 2009).

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que é aconselhável a estabilização por meio de aditivos químicos quando um material ou mistura de materiais necessita ter a sua resistência melhorada, ou ainda, quando a estabilidade mecânica adequada não pode ser obtida.

Yoder e Witczak (1975) descrevem diferentes aditivos que podem ser utilizados para estabilização química, sendo eles: agentes cimentantes, materiais que possuem pozolana (cinza da casca de arroz), modificadores, impermeabilizantes, agentes de retenção de água e produtos químicos diversos. Para os autores, o comportamento de cada mistura é diferenciado, tendo em vista que cada uma tem determinada função e suas próprias limitações. O cimento Portland é o agente cimentante mais utilizado e com maior sucesso, podendo ser empregado para camadas de base e de sub-bases, em solos granulares, siltosos e argilas.

Além disso, Yoder e Witzak (1975) citam a cal hidratada e as cinzas volantes. A cal é considerada o material mais eficiente quando utilizada em materiais granulares e argilas, devido a sua ação pozolânica que gera o aumento da força do solo. A quantidade necessária de cal para uma boa hidratação é relativamente baixa. Quanto às cinzas volantes, normalmente apresentam teores elevados de sílica e alumina, além de possuir menores teores de ferro e cálcio, deste modo, a adição de cal em solos para a utilização das cinzas volantes acelera a ação pozolânica.

Almeida (2009) explica que o material fresado apresenta características granulares, e por isso, estes são adequados para mistura estabilizada quimicamente, pois atingem maior resistência com menor teor de cimento. A estabilização do material fresado surge como alternativa ao uso de britas, que geralmente são utilizadas em misturas asfálticas.

Marques (2009) destaca as principais modificações proporcionadas pelo processo de estabilização: aumento da resistência dos solos, proporcionando o aumento da sua capacidade de suporte; melhoria no grau de compactação; a expansão do solo é reduzida; o limite de contração aumenta; proporciona uma melhor trabalhabilidade pois ocorre uma redução do índice de plasticidade; permeabilidade diminui e durabilidade aumenta.

## **2.6. Dimensionamento de pavimentos**

O dimensionamento de pavimentos tem como objetivo determinar as espessuras e os tipos de materiais a serem empregados na sua execução, de forma a conceber uma estrutura capaz de resistir às cargas de tráfego bem como o clima local, fornecendo o desempenho adequado às suas funções (Balbo, 2007). Segundo Bernucci *et al.* (2008), o comportamento estrutural do pavimento depende da espessura das camadas, das características mecânicas destas e do subleito, bem como da interação entre as mesmas.

Para Balbo (2007), os métodos dimensionamento utilizados em projeto de pavimentos podem ser divididos em: empíricos, semi-empíricos e semiempíricos-mecanicistas. Os modelos empíricos são oriundos de modelagem estatística da evolução de parâmetros físicos observados em campo. Os critérios semi-empíricos são gerados de extrapolação teórica e racional de modelo de observação oriundo do acúmulo de dados e experiências. Já os métodos empírico-mecanicistas levam em consideração o comportamento das estruturas do sistema de camadas de pavimentos, realizando a parametrização dos materiais através de conhecimento empírico, ensaios laboratoriais e campo, em termos de características mecânicas dos materiais.

No método empírico do DNER(1981), elaborado pelo Eng<sup>o</sup> Murillo Lopes de Souza, o pavimento é dimensionado em função do ISC, dos materiais que constituem as camadas do pavimento, bem como dados de tráfego. Este método atende quanto aos requisitos de ruptura por cisalhamento e deformações permanentes, porém a repetição do carregamento pode causar a ruptura do revestimento por fadiga se não for levado em conta o limite admissível das deformações elásticas para o N de projeto (PINTO, PREUSSLER, 2002).

Segundo Rodrigues (2013), durante a 2<sup>a</sup> guerra mundial, devido ao fluxo dos aviões, foi verificada rápida deterioração dos pavimentos sujeitos a estas cargas, o que tornou necessário o desenvolvimento de metodologias de previsões mais eficazes do ponto de vista de comportamento dos pavimentos. Dentro deste contexto, surge o método de dimensionamento da AASHTO, aliando a experiência dos projetistas aos resultados de ensaios efetuados em pavimentos sujeitos às solicitações das cargas do tráfego e condições climáticas do local, bem como ao conhecimento mais aprofundado das propriedades dos materiais.

Para Medina *et al.* (2005) o uso dos métodos empíricos-mecanísticos tornaram-se uma tendência mundial para o dimensionamento de pavimentos. Este método leva em consideração a fadiga e a deformabilidade que são determinadas por meio de análise estrutural e no cálculo de tensões e deformações, baseado na teoria da elasticidade. O empirismo do método está relacionado à correta estimativa do tráfego previsto e aos parâmetros experimentais do modelo, determinadas através de ensaios laboratoriais e no campo.

Para Neto (2004), as análises mecánísticas permitem que modificações na estrutura sejam realizadas de forma que um melhor e mais adequado desempenho seja atingido para cada material que constitui o pavimento, de modo que todas as camadas sejam solicitadas de forma equilibrada, diminuindo o risco de ruptura precoce à fadiga.

Esta pesquisa contempla o dimensionamento de pavimentos através do método da AASHTO e de análises mecánísticas. Inicialmente, realizou-se um pré-dimensionamento do pavimento pelo método da AASHTO, com o objetivo de obter as espessuras preliminares das camadas estruturais que foram então submetidas a análises mecánísticas através do software Everstress.

A opção pelo método da AASHTO para determinação da estrutura preliminar do pavimento fundamentou-se na premissa de que o método proposto pelo Eng<sup>o</sup> Murillo Lopes de Souza, também conhecido como método de DNER, considera somente o Número N para determinação da espessura do revestimento (DNER, 1981), não fazendo distinção entre bases rígidas ou flexíveis, sendo que para bases cimentadas, objeto da pesquisa, o dimensionamento das estruturas pelo método do DNER não traria benefício à camada de revestimento. O

método do DNER foi concebido para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, não sendo utilizado para pavimentos semi-rígidos.

O método da AASHTO, além de considerar o tráfego atuante, analisa a qualidade da camada imediatamente inferior para o cálculo da espessura do revestimento, podendo resultar em reduções significativas da espessura da camada asfáltica no caso de bases cimentadas (AASHTO, 1993).

### 2.6.1. Método da AASHTO

Segundo Balbo (2007), o método para dimensionamento de pavimentos da AASHTO baseia-se na análise estatística dos resultados obtidos na Pista Experimental da AASHTO, em Ottawa, no Estado de Illinois (EUA).

As equações para o dimensionamento pelo método da AASHTO são fundamentadas em questões relacionadas à serventia e ao desempenho, onde a serventia pode ser definida como medida da habilidade do pavimento em cumprir suas funções em um determinado tempo e desempenho e a medida da história da serventia de um pavimento no decorrer do tempo (Balbo, 2007). A equação (2.6.1) relaciona estas variáveis com o número N. Segundo Franco (2007), as solicitações de tráfego sobre uma rodovia são expressas pelo número N de repetições de carga de um eixo padrão, definido como sendo um eixo simples de rodas duplas, carregado com 8,2 toneladas.

$$\log_{10}N = Z_r \times S_0 \times 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \frac{p_0 - p_t}{p_0 - 1,5}}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10}MR - 8,07 \quad (2.6.1)$$

Onde:

- N é o número N de repetições de carga equivalentes ao eixo padrão;
- SN é o número estrutural do pavimento, equação (2.6.2).
- $p_0$  é a serventia inicial, na AASHTO Road Test, o valor médio obtido foi de 4,2.
- $p_t$  é a serventia terminal. Os valores sugeridos pela AASHTO são: para vias principais:  $p_t = 2,5$  a  $3,0$ ; para vias secundárias:  $p_t = 2,0$ .
- MR é o módulo de resiliência (MPa);
- $Z_r$  é o nível de confiança do projeto.
- $S_0$  é o desvio padrão associado. A AASHTO (1995) recomenda os valores de 0,35 para pavimentos rígido e 0,45 para pavimentos flexíveis.

A Tabela 1, apresenta o nível de confiança de projeto, que é definido em função da classificação da via (Balbo,2007):

Tabela 1 - Nível de confiança de projeto Zr

<b>Classificação Funcional da Via</b>	<b>Urbana (%)</b>	<b>Rural (%)</b>
Interestaduais e auto-estradas	85-99,9	80-99,9
Arteriais principais	80-99	75-95
Coletoras	80-95	75-95
Locais	50-80	50-80

Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

Balbo (2007) descreve SN como um valor abstrato, que expressa a capacidade estrutural de dado pavimento, necessário para combinação de suporte do subleito. Para determinar o número estrutural do pavimento, utiliza-se a equação(2.6.2):

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 + D_3 \times m_3 \quad (2.6.2)$$

Em que:

- $a_i$  é o coeficiente estrutural da i-ésima camada;
- $D_i$  é a espessura da i-ésima camada (“);
- $m_i$  é o coeficiente de drenagem da i-ésima camada.

Os coeficientes de equivalência estrutural dos materiais são definidos pela AASHTO (1993), conforme Tabela 2:

Tabela 2 - Coeficientes de equivalência estrutural.

Material	Parâmetros de controle	a
CBUQ, PMQ, a 20°C	MR = 3.160 MPa	0,44
	MR = 2.110 MPa	0,37
	MR = 1.406 MPa	0,30
Bases granulares	CBR = 100%	0,14
	CBR = 33%	0,10
Sub-bases granulares	CBR = 100%	0,14
	CBR = 23%	0,10
Materiais cimentados (aos sete dias)	$R_{c,7} = 5,6$ MPa	0,22
	$R_{c,7} = 3,1$ MPa	0,16
	$R_{c,7} = 1,4$ MPa	0,13

Fonte: Adaptado de AASHTO (1993) e Balbo (2007).

Balbo (2007) considera que os coeficientes de drenagem variam de acordo com o tempo exigido para a remoção da água do pavimento. Para o autor, a qualidade de drenagem pode ser dividida em: excelente: até 2 horas para drenar, boa: 1 dia para drenar, regular: 1 semana para drenar, pobre = 1 mês e muito pobre: não é drenada. Com base na qualidade da drenagem, a Tabela 3 apresenta os valores para modificação dos coeficientes de camadas granulares de bases e sub-bases.

**Tabela 3 - Coeficientes de drenagem**

Qualidade da Drenagem	% de tempo que o pavimento estará sujeito a condições de umidade próximo à saturação			
	< 1%	1% à 5%	5% à 25%	> 25%
Excelente	1,4 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,20
Boa	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1,00
Regular	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,00 - 0,80	0,80
Pobre	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,60
Muito Pobre	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,40

Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

A determinação das espessuras das camadas é realizada segundo as equações (2.6.3), (2.6.4) e (2.6.5), respectivamente para o revestimento, base e sub-base.

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad (2.6.3)$$

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 \times m_2} \quad (2.6.4)$$

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 \times m_3} \quad (2.6.5)$$

Onde:

- $D_i$  é a espessura da camada  $i$ ;
- $SN_i$  é o número estrutural sobre a camada  $i$ ;
- $a_i$  é o coeficiente estrutural da camada  $i$  e
- $m_i$  é o coeficiente de drenagem da camada  $i$ .

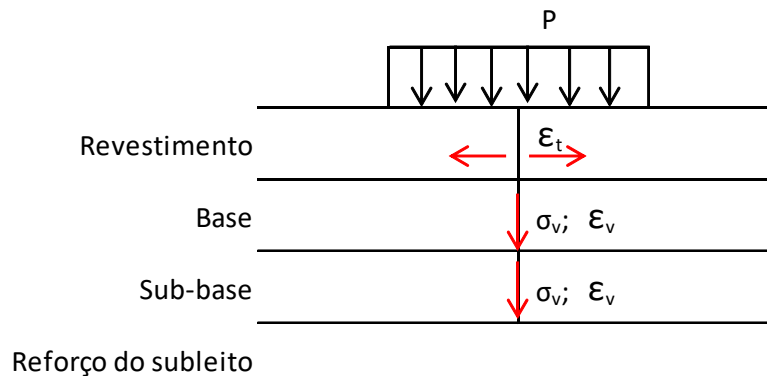


### 2.6.2. Método Mecanístico

Para Franco (2007), o método mecanístico tem como objetivo o dimensionamento do pavimento em função das deformações elásticas e plásticas, levando em consideração os seguintes parâmetros, conforme pode ser verificado na Figura 8:

- deformação de tração na face inferior do revestimento asfáltico,
- a tensão no topo da camada de base;
- tensão ou deformação vertical no topo do subleito.

Figura 8 -. Tensões e deformações atuantes na estrutura do pavimento

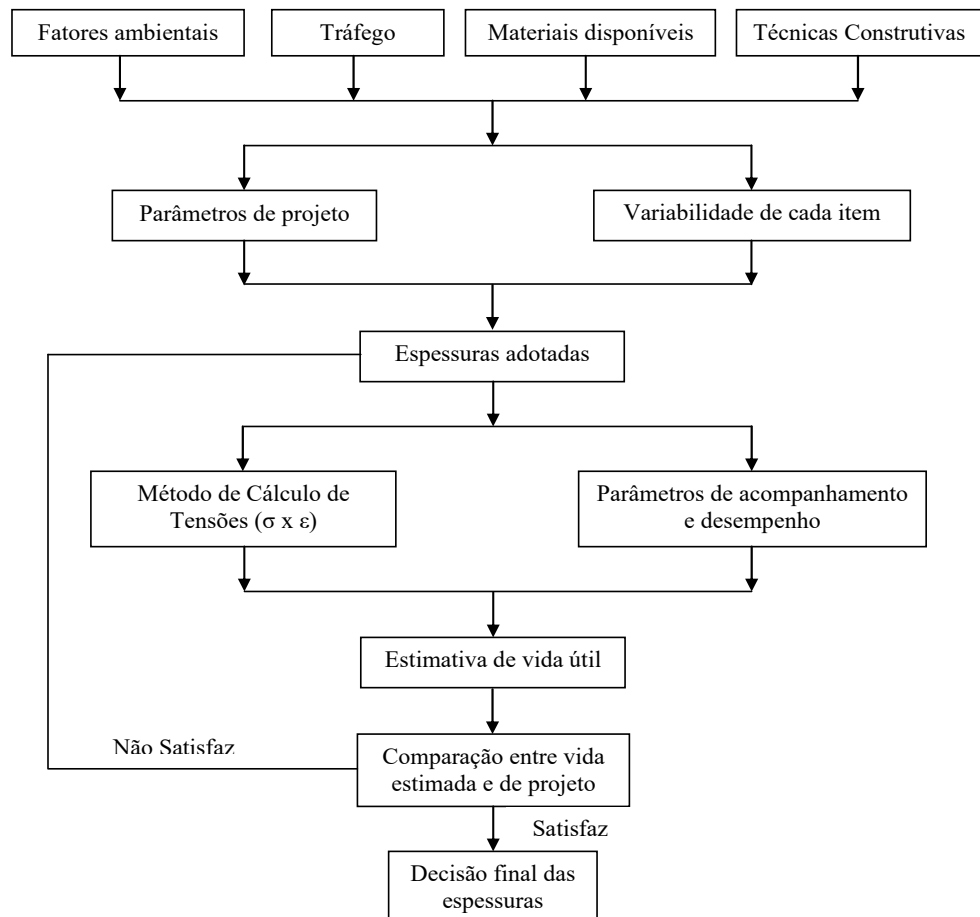


Fonte: Adaptado de Franco (2007).

Neto (2004) descreve que um método é considerado mecanístico quando utiliza os conceitos da mecânica para prever as tensões e deformações geradas pelas cargas solicitantes e pelos fatores climáticos na estrutura do pavimento e as compatibiliza com as tensões resistentes dos materiais. De acordo com Pinto e Preussler (2002), conhecer as tensões e deformações que atuam em determinado pavimento, permite avaliar a possível ocorrência de fadiga durante o horizonte de projeto.

Motta (1991) apresentou em sua tese de doutorado uma consolidação dos estudos sobre a Mecânica dos Pavimentos desenvolvidos na COPPE/UFRJ desde os anos 70. No método proposto são consideradas as influências climatológicas, conceitos de serventia e desempenho, o parâmetro de tráfego, os materiais, a capacidade de suporte e a fadiga. Neste método, é adotada uma estrutura inicial, define-se a variabilidade dos dados e o nível de confiabilidade a ser utilizado para o projeto. Na Figura 9 é apresentado o fluxograma desenvolvido por Motta (1991), para o dimensionamento de pavimentos pelo método mecanístico-empírico.

Figura 9 - Esquema de proposta de método de dimensionamento



Fonte: Adaptado de Motta (1991)

Segundo Motta (1991), as análises mecânicas de determinada estrutura do pavimento consistem em se testar uma estrutura proposta, conforme as tensões e deformações ocorridas a partir da interação entre as mesmas, com base na teoria da elasticidade, com o intuito de se obter a melhor configuração estrutural possível. A análise é determinada pelo equilíbrio entre as tensões e deformações impostas pelas cargas do tráfego às camadas e a resistência dos materiais que a constituem. Segundo Motta (1991), se algum critério não seja satisfeito, altera-se as espessuras das camadas e o cálculo deve ser refeito.

A análise mecânica é realizada utilizando-se programas computacionais desenvolvidos para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos em sistemas de camadas elásticas. Dos softwares pode ser citado o Medina, *Elsym5*, *Fepave2*, *Pave*, *Mecaf3D*, *Everstress*, entre outros.

### 2.6.3. Modelos de previsão de desempenho

O dimensionamento do pavimento pelo método mecanístico considera o uso de modelos de previsão de desempenho ou fadiga dos materiais que compõem a sua estrutura. Os modelos foram desenvolvidos em laboratório ou em pistas experimentais e apresentam a previsão das repetições de carga para atingir o trincamento por fadiga (Johnston, 2010).

Fadiga, de acordo com Franco (2007), pode ser definida como um processo de degradação estrutural, progressivo, localizado e permanente, que ocorre em um determinado material submetido a tensões e deformações repetidas em um determinado ponto, que possam terminar em fissuras ou ruptura completa do material após um determinado número de repetições.

Para Franco (2007), são modelos que avaliam o pavimento quanto aos critérios de ruptura, existindo a avaliação do dano quanto à ruptura estrutural e a funcional. A ruptura estrutural considera o colapso da estrutura, enquanto a ruptura funcional é caracterizada pelo desconforto ao rolamento, trincamento, deformações permanentes, entre outros.

Balbo (1993) e Trichês (1993) propuseram modelos de previsão de desempenho (fadiga) para o cálculo de tensões de tração na flexão na fibra inferior da camada cimentada para materiais como BGTC (brita graduada tratada com cimento) e CCR (concreto compactado a rolo), conforme Equação (2.6.6) e Equação (2.6.7), respectivamente:

$$\log_{10}N_f = 17,137 - 19,608 \times RT \quad (2.6.6)$$

$$\log_{10}N_f = 14,310 - 13,518 \times RT \quad (2.6.7)$$

Onde:

$N_f$  = Número de ciclos aplicado sobre o material, ou seja, a vida de fadiga;

$RT$  = relação entre a tensão de tração na face inferior da camada cimentada e a resistência à tração na flexão do material cimentado.

Os modelos de Balbo (1993) e Trichês (1993) apresentam a relação  $RT$  que se trata da relação entre tensão aplicada e a resistência à tração na flexão do material, conforme a Equação (2.6.8).

$$RT = \left( \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{f_{ct,f}} \right) \quad (2.6.8)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  = é a tensão aplicada;

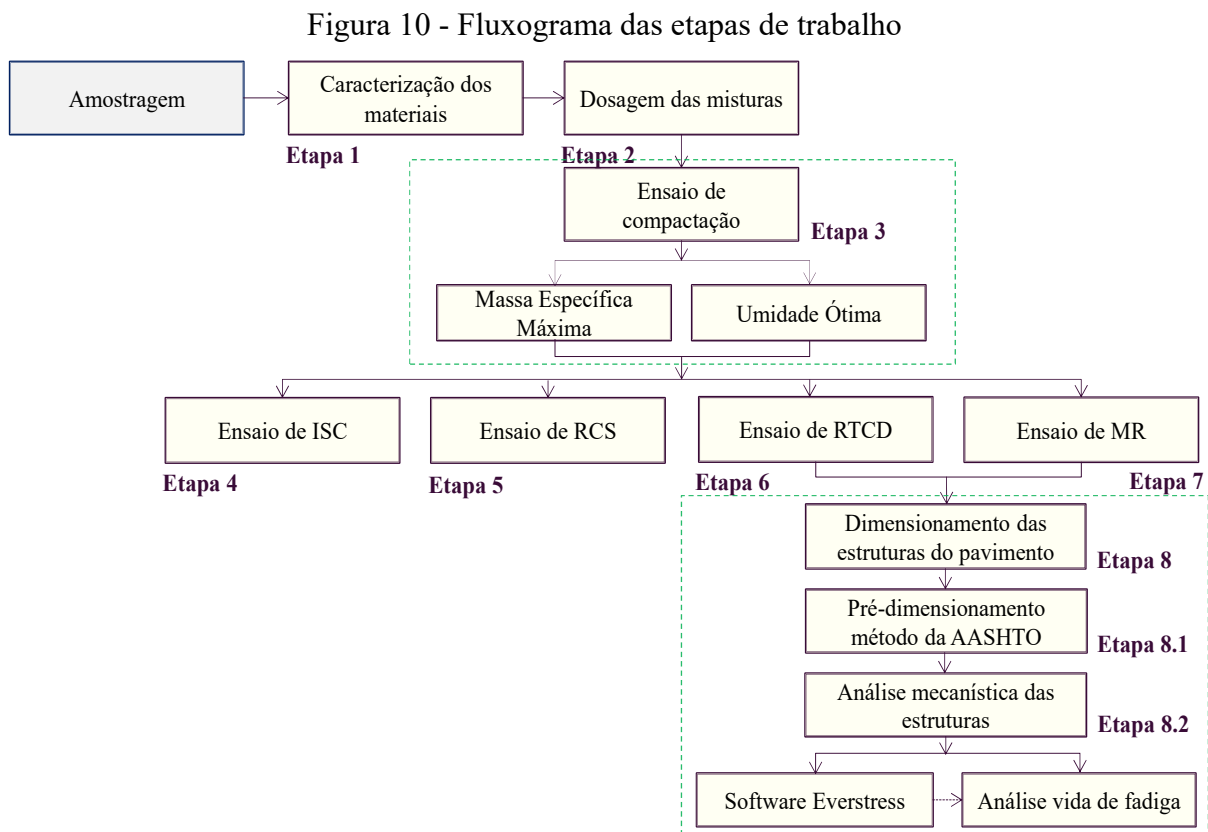
$f_{ct,f}$  = é a resistência à tração na flexão do material.

Para Bernucci *et al.* (2008), a resistência à fadiga de materiais é de extrema importância para o conhecimento da vida útil do mesmo, que é obtida através da quantidade de aplicações de cargas repetidas para quais o material resiste.

Para o estudo em questão, será utilizado o modelo de Balbo (1993) para a brita graduada tratada com cimento - BGTC por mais se assemelhar ao material que será gerado através da reciclagem com adição de cimento.

### 3. METODOLOGIA

Esta pesquisa contemplou a realização de ensaios laboratoriais, efetivados no laboratório da empresa Ecoplan Engenharia Ltda., para a caracterização do material fresado e dos agregados, determinação dos parâmetros de compactação e de resistência, bem como ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência na compressão diametral, que foram gentilmente realizados no laboratório da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Ademais, este estudo apresenta o pré-dimensionamento do pavimento pelo método da AASHTO para determinação das espessuras preliminares do pavimento bem como as análises mecânicas realizadas através do software *Everstress* para o dimensionamento das estruturas do pavimento. O presente estudo foi estruturado em etapas, conforme Figura 10:



Fonte: Autoria própria (2020).

O resumo de cada etapa da pesquisa está apresentado a seguir:

- (i) Etapa 1: Caracterização dos materiais: Consiste na realização de ensaios de granulometria por peneiramento para obtenção da curva granulométrica e caracterização do material fresado e dos agregados estudados na pesquisa;

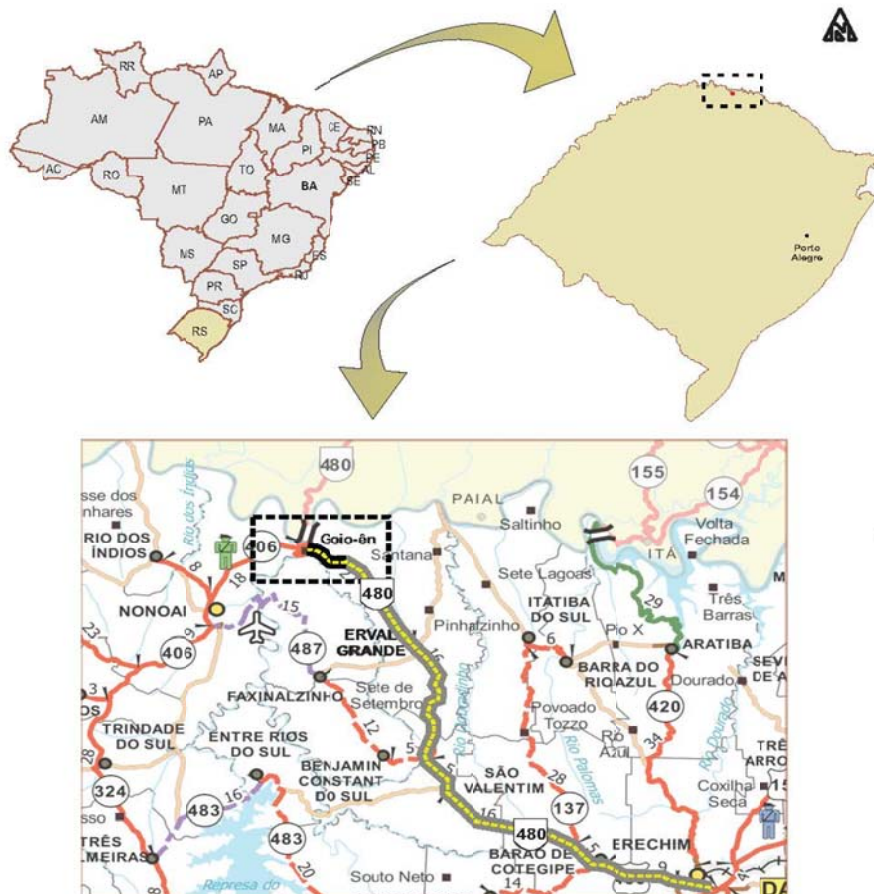
- (ii) Etapa 2: Dosagem das misturas: Caracteriza-se pela definição dos percentuais de material fresado e cimento utilizados na pesquisa, bem como o fracionamento dos agregados disponíveis de forma a se obter o ajuste granulométrico em uma das faixas estabelecidas pela especificação de serviço DNIT 167/2013 – ES;
- (iii) Etapa 3: Ensaios de compactação: Os ensaios foram realizados à energia Proctor modificada para obtenção da massa específica aparente seca máxima e umidade ótima das misturas, utilizada para moldagem dos corpos-de-prova nos demais ensaios;
- (iv) Etapa 4: Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC: Com os resultados obtidos na etapa 3, foram moldados corpos-de-prova em triplicata para realização do ensaio de ISC. Esta etapa teve como finalidade a verificação da capacidade de suporte das misturas sem adição de cimento e sua utilização em camadas de pavimentos, conforme DNIT 139 /2013 – ES e DNIT 141/2013 – ES;
- (v) Etapa 5: Ensaio de resistência à compressão Simples – RCS: Teve como objetivo verificar a resistência das amostras quando submetidas a esforços de compressão através da aplicação de carga até sua ruptura. Este ensaio foi realizado para as misturas com adição de cimento, de forma a se verificar se os resultados atendem aos critérios de RCS aos 7 dias estabelecidos na norma DNIT 167/2013 – ES para reciclagem com adição de cimento;
- (vi) Etapa 6: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral – RTCD: Ensaio realizado através da aplicação de carga nos corpos-de-prova até o rompimento por tração. Assim como o ensaio de RCS, esta etapa foi realizada com o objetivo de verificar o atendimento aos critérios estabelecidos na especificação de serviço DNIT 167/2013 – ES para RTCD aos 7 dias. Os resultados dos ensaios RTCD obtidos aos 28 dias foram utilizados no projeto de dimensionamento do pavimento. Ademais, o resultado do rompimento de um corpo de prova por tração foi utilizado como parâmetro para realização do ensaio de MR;
- (vii) Etapa 7: Ensaio de módulo de resiliência – MR: Realizado para obtenção do módulo de elasticidade e comportamento das misturas quanto à rigidez. Os resultados obtidos no ensaio foram utilizados no projeto de dimensionamento das estruturas do pavimento;
- (viii) Etapa 8: Dimensionamento das estruturas do pavimento: Dividida em 2 etapas conforme a seguir:

- Etapa 8.1: Pré-dimensionamento método da AASHTO: Esta etapa teve como objetivo a obtenção das espessuras iniciais das camadas do pavimento, utilizadas como ponto de partida no software *Everstress* para análise mecânica.
- Etapa 8.2: Análises mecânicas: Teve como finalidade a determinação das estruturas do pavimento e das espessuras das camadas de base recicladas para cada mistura estudada através do software *Everstress* e modelos de previsão de desempenho.

### 3.1. Amostragem

As amostras de material fresado para o estudo da reciclagem foram obtidas das obras de restauração e manutenção da rodovia RSC-480, Trecho Entr. ERS-406 (Goio En) – Erval Grande, Segmento: km 4,5 – km 6,0, localizada conforme Figura 11.

Figura 11 - Mapa de situação e localização da RSC-480



Fonte: Elaboração própria (2020).

A estrutura do pavimento existente na RSC-480 é do tipo flexível, sendo o revestimento de CBUQ (concreto betuminoso usinado à quente) com espessura de 4 cm, pré-misturado a quente com graduação aberta com 8 cm e com base e sub-base de brita graduada com espessura média de 24 cm (DAER, 1979).

As operações de fresagem atingiram a totalidade da camada de revestimento asfáltico e foram executadas através de máquina fresadora de asfalto Wirtgen, modelo W1000L (Figura 12 e Figura 13). Para a realização dos ensaios, no dia 24/09/2018 foram coletados cerca de 200 kg de um mesmo montante de material proveniente da fresagem ocorrida entre o km 5,2 e km 5,4 da RSC-480, conforme Figura 14 e Figura 15. Após este processo, o material foi estocado em sacos e alocado no laboratório da empresa Ecoplan Engenharia Ltda. para posterior realização dos ensaios.

Figura 12 - Fresagem do pavimento RSC-480



Figura 13 – Pavimento fresado RSC-480



Figura 14 – Pilha de material fresado



Figura 15 - Coleta do material fresado



Fonte: Autoria Própria (2018)

Os materiais utilizados na pesquisa são constituídos de fresado asfáltico (Figura 16) e materiais granulares dos tipos: areia fina, areia industrial, brita 0,1, pedrisco ½” (Figura 17),



pedrisco 3/8", pedrisco 3/8" lascado, *filler* (Figura 18) e pó fino, além de cimento. Os agregados virgens foram provenientes da Pedreira Vila Rica.

Figura 16 - Material fresado



Figura 17 - Pedrisco 1/2"



Figura 18 - Filler



Fonte: Autoria Própria (2019)

O cimento utilizado no estudo foi do tipo CP II E 32, cimento composto por escória de alto forno, por se tratar de um dos cimentos mais utilizados no país e ser facilmente encontrado no comércio. Além disso, a *Association Mondiale de la Route* (2003) recomenda a utilização de cimento composto e de classe de resistência intermediária para reciclagem de pavimentos por apresentar em suas propriedades baixo calor de hidratação, trazendo a trabalhabilidade compatível com o processo de execução (PAIVA, OLIVEIRA, 2013).

### 3.2. Etapa 1: Caracterização dos materiais

Para caracterização granulométrica dos materiais foram realizados ensaios por peneiramento manual conforme recomenda a norma de DNER-ME 083/98 - Agregados - análise granulométrica (DNER, 1998).

As amostras de material fresado foram secas ao ar (Figura 19), a fim de evitar o aquecimento do ligante asfáltico e a aglutinação das partículas, enquanto as amostras dos agregados foram secas em estufa de marca De Leo tipo A.3.C a 60° C, por 12 horas (Figura 20). Em seguida, foram desagregados os torrões para homegeinização dos materiais através de almofariz. Após, as porções foram reduzidas com o auxílio de repartidor (Figura 21) a fim de se obter uma amostra representativa.

Figura 19 - Secagem do fresado



Figura 20 - Secagem dos agregados



Figura 21 – Repartidor de amostras



Fonte: Autoria Própria (2019).

O peso total da amostra seca foi obtido através da pesagem da amostra representativa (Figura 22). Para a análise granulométrica, a amostra foi submetida ao peneiramento através de série de peneiras: 50,8, 25,4, 9,5, 4,75, 2,00, 0,425 e 0,075 mm de diâmetro (Figura 23), indicadas na especificação de serviço DNIT 167/2013-ES (Tabela 4).

As frações de material retidas em cada peneira foram pesadas na balança digital de marca Solotest e então, foram calculados os percentuais retidos em cada peneira em relação ao peso da amostra total seca. A porcentagem passante resultou do peso de cada material passante na peneira, com relação ao peso seco total da amostra. Na Figura 24 apresenta-se a granulometria do material fresado retido em cada peneira.

Figura 22 – Pesagem da amostra representativa seca



Figura 23 – Peneiramento dos materiais



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 24 – Granulometria do fresado retido em cada peneira



Fonte: Autoria Própria (2019)

Com os percentuais passantes em cada peneira, realizou-se o comparativo da granulometria do fresado com as faixas “I” e “II” da especificação DNIT 167/2013-ES.

### 3.3. Etapa 2: Dosagem das misturas

Os percentuais de material fresado utilizados na pesquisa foram determinados de forma a simular a mistura reciclada dentro e acima dos limites recomendados pela normativa DNIT 167/2013-ES. As misturas propostas foram definidas nas proporções: 50% de fresado e 50% agregados virgens, baseado nas pesquisas realizadas por Gusmão (2008) e Fedrigo (2015) e 70% fresado e 30% agregados virgens conforme estudos realizados por Specht *et al.* (2013), Pires (2014) e Ely (2014).

Os percentuais de cimento utilizados na pesquisa foram de 0%, 3% e 6%. Para definição dos teores a serem estudados, considerou-se a análise do comportamento das misturas não cimentadas (Silva, 2012) (Specht *et al.*, 2013) (Pires, 2014) (Ely, 2014) (Hermes *et al.*, 2016) (Molz, 2017). Já a adição de 6% foi ponderada por se tratar do máximo teor verificado nas pesquisas contempladas na revisão bibliográfica (Pires, 2014) (Fedrigo, 2015) e 3% de cimento, por ser o teor intermediário observado nos estudos realizados pelos autores abordados na bibliografia (Gusmão, 2008) (Specht *et al.*, 2013) (Pires, 2014).

A especificação de serviço DNIT 167/2013-ES para reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland estabelece que a mistura reciclada deve ser composta de granulometria densa e bem graduada, além de se enquadrar nas faixas granulométricas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição Granulométrica da mistura reciclada

Tabela 1 – Composição granulométrica				
Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em massa (%)		Tolerância da faixa de projeto (%)
ABNT	Abertura (mm)	I	II	
2"	50,8	100	100	
1"	25,4	75 – 90	100	± 7
3/8"	9,50	40 – 75	50 – 85	± 7
Nº 4	4,75	30 – 60	35 – 65	± 5
Nº 10	2,0	20 – 45	25 – 50	± 5
Nº 40	0,425	15 – 30	15 - 30	± 2
Nº 200	0,075	5 - 15	5 - 15	± 2

Fonte: DNIT 167/2013-ES (2013)

Além disso, para a obtenção de um bom comportamento da mistura reciclada, a norma recomenda verificar os seguintes aspectos:

- O percentual de material fresado deve ser limitado a 50% da massa seca misturada;
- No mínimo 95% do material deve passar na peneira 2”;
- O percentual máximo de 15% de finos passantes na peneira nº 200,
- Não poderão existir grandes descontinuidades na curva granulométrica;
- Resistência compressão simples (RCS), aos 7 dias de cura, entre 2,1 a 2,5 MPa;
- Resistência à tração por compressão diametral (RTCD), aos 7 dias, entre 0,25 e 0,35 MPa.

A estabilização granulométrica das misturas foi realizada através do fracionamento do fresado e materiais granulares disponíveis através de ferramenta da Microsoft Excel – Solver, de forma a atender as faixas granulométricas estabelecidas pela especificação DNIT 167/2013-ES. A Tabela 5 apresenta a matriz das misturas propostas no estudo. Na Figura 25 e Figura 26 estão apresentados os percentuais de materiais utilizados.

Tabela 5 - Matriz das misturas

Mistura		% fresado	% agregados		% cimento
			filler	pedrisco 1/2"	
1	50/50	50	20	30	0
2	50/50	50	20	30	3
3	50/50	50	20	30	6
4	70/30	70	20	10	0
5	70/30	70	20	10	3
6	70/30	70	20	10	6

Fonte: Autoria Própria (2019).

Figura 25 - 50% fresado, 50% agregados



Figura 26 - 70% fresado, 30% agregados



Fonte: Autoria Própria (2019).

Observa-se que faixas “I” e “II” definidas na especificação DNIT 167/2013-ES são equivalentes às faixas “B” e “C” da especificação DNIT 141/2010-ES.

### 3.4. Etapa 3: Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com o método de ensaio DNIT-ME 164/2013 (DNIT, 2013a) bem como norma ABNT NBR 7182:2016 e tiveram como objetivo determinar a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo do fresado e das misturas.

A amostra de material fresado foi seca ao ar, enquanto a secagem do material granular foi realizada na estufa de marca De Leo tipo A.3.C a temperatura de 60°C. Os materiais foram reduzidos através de repartidor de amostras até se obter uma amostra representativa. Após, realizou-se o peneiramento da amostra representativa na peneira de 19 mm, onde o material retido na peneira foi substituído por igual quantidade em massa do material passante na peneira de 19 mm e retido na peneira de 4,8 mm.

Em seguida, os materiais constituintes das misturas sem adição de cimento, foram inseridos em uma bandeja e misturados. Aos materiais homogêneos na bandeja, foi adicionada a umidade inicial que variou de 1 a 2,5% sobre a massa total das misturas para a determinação do primeiro ponto da curva de compactação.

Para a realização do ensaio, definiu-se a utilização da energia modificada, recomendada pela normativa DNIT 167/2013-ES. Os corpos de prova foram moldados em cinco camadas, aplicando-se 55 (cinquenta e cinco) golpes distribuídos de forma uniforme sobre a superfície (Figura 27), equivalente à Energia Modificada de 25 kg.cm/cm<sup>3</sup>. Após, foi removido o

excedente de material na superfície e emparelhado com a altura do molde. A energia equivalente à Proctor modificado é calculada através da equação (3.4.1):

$$E = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V} \quad (3.4.1)$$

Onde:

E = energia de compactação por unidade de volume;

P = peso do soquete padrão de 4,536 kg;

h = altura de queda do soquete de 45,7cm;

N = número de golpes por camada;

Nc = número de camadas;

V = volume da amostra (cm<sup>3</sup>).

Com o auxílio de extrator (Figura 28), os corpos de prova foram removidos dos moldes de onde se coletou uma amostra do material, que foi inserido em cápsula de alumínio com tampa capaz de impedir a perda de umidade durante a pesagem. Então, a amostra úmida foi pesada na balança digital de marca Marte Slim Modelo ML 600 e inserida na estufa de marca De Leo tipo A.3.C, a uma temperatura de 110° C, por um período de 12 horas. Após a secagem, as amostras foram novamente pesadas, a fim de obter a umidade em cada ponto (Figura 29). Esse processo foi repetido por mais quatro vezes para cada material, aumentando-se o percentual de umidade aplicado a cada ponto da curva.

Figura 27 - Ensaio de compactação



Figura 28 - Extração de molde



Figura 29 - Pesagem para obtenção da umidade



Os teores de umidade foram calculados através da equação (3.4.2), de acordo com DNIT-ME 164/2013 e ABNT NBR 7182:2016, determinados através da quantidade de água presente nos vazios do solo.

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \quad (3.4.2)$$

Onde:

h: teor de umidade em percentual;

Ph: peso da amostra úmida, em gramas;

Ps: peso da amostra seca em estufa, em gramas.

Quanto à massa específica aparente do solo seco, determinou-se a massa específica aparente do solo úmido de acordo com DNIT-ME 164/2013 e ABNT NBR 7182:2016 após cada compactação, através da equação (3.4.3):

$$\gamma_h = \frac{Ph}{V} \times \quad (3.4.3)$$

Onde:

$\gamma_h$  : massa específica do solo úmido, em g/cm<sup>3</sup>;

Ph: peso do solo úmido, em gramas;

V: volume de solo compactado, em cm<sup>3</sup> (capacidade do molde).

A massa específica aparente do solo seco após cada compactação foi obtida através da equação (3.4.4):

$$\gamma_s = \gamma_h \times \frac{100}{100 + h} \quad (3.4.4)$$

Onde:

$\gamma_s$  : massa específica aparente do solo seco, em g/cm<sup>3</sup>;

$\gamma_h$  : massa específica do solo úmido, em g/cm<sup>3</sup>;

h: teor de umidade do solo compactado, obtido conforme equação (3.4.2).

Com os resultados obtidos, traçou-se a curva de compactação, de onde foi determinada a massa específica aparente seca máxima, que é a ordenada máxima da curva de compactação a um teor de umidade ótimo correspondente.

### 3.5. Etapa 4: Ensaio de Índice de Suporte Califórnia - ISC

O ensaio ISC - Índice de Suporte Califórnia, também conhecido como CBR (California Bearing Ratio) foi realizado de acordo com a norma DNIT 172/2016-ME (DNIT, 2016b) e tem como objetivo definir a capacidade de suporte de solos e de materiais utilizados na pavimentação. O ensaio de ISC permite ainda determinar a expansibilidade do solo.

A partir dos valores obtidos para a umidade ótima e massa específica aparente seca máxima nos ensaios de compactação, moldaram-se os corpos-de-prova em triplicata para realização dos ensaios de ISC para o material fresado puro e para as misturas sem adição de cimento, a uma energia modificada (Figura 30).

Após, os corpos-de-prova foram imersos em água por 7 (sete) dias (Figura 31), sendo realizadas leituras no extensômetro a cada 24 horas durante 4 (quatro) dias para se obter os valores de expansão. Conforme DNIT 160/2016-ME (DNIT, 2016a), a expansibilidade determina o aumento do volume apresentado por determinados materiais quando entram em contato com a água ou quando a pressão é reduzida sobre eles.

Após o período de imersão, foi realizado o ensaio de penetração (Figura 32) através de um pistão cilíndrico a uma velocidade de 1,27 mm/min. Através do anel dinamométrico da prensa, foi possível registrar os valores das pressões à penetração. Para realização dos ensaios foi utilizada a prensa da marca Solotest, com anel dinamométrico com capacidade de 5.000 kgf.

Figura 30 - Compactação e moldagem do CP



Figura 31 – Corpos de prova imersos em água



Figura 32 - Ensaio de penetração





De acordo com o método de ensaio DNIT 172/2016-ME, para calcular o ISC foram utilizadas as pressões verificadas no anel dinamométrico para as penetrações de 2,54 e 5,08 mm, através da Equação (3.5.1):

$$ISC = \frac{\textit{pressão calculada ou corrigida}}{\textit{pressão padrão}} \quad (3.5.1)$$

Onde:

- pressão padrão: de 70,31 kgf/cm<sup>2</sup> para penetração de 2,54 mm e de 105,46 kgf/cm<sup>2</sup> para penetração de 5,08 mm.

O valor do CBR resultante é o maior dos valores obtidos para as penetrações.

As normas DNIT 139/2010 - ES e DNIT 141/2010 – ES definem os valores mínimos de ISC e expansão para as diferentes aplicações nas camadas do pavimento:

- Base: ISC  $\geq$  60% para Número N  $\leq$  5 X 10<sup>6</sup>, ISC  $\geq$  80% para Número N  $>$  5 X 10<sup>6</sup>, e Expansão  $\leq$  0,5%,

- Sub-base: ISC  $\geq$  20% e Expansão  $\leq$  1%,

- Reforço do subleito: ISC  $>$  ISC sub-base e Expansão  $\leq$  2%.

### 3.6. Etapa 5: Ensaio de resistência à compressão simples - RCS

Este ensaio foi realizado através do rompimento dos corpos de prova, conforme preconiza o método de ensaio DNER-ME 091/98 (DNIT, 1998), utilizando-se uma prensa hidráulica digital da marca Solotest, com capacidade de 100 tf.

Para os ensaios de resistência à compressão simples, foram moldados três corpos-de-prova de forma cilíndrica, com medidas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para as misturas com adição de cimento. A compactação foi realizada em 5 camadas iguais a uma energia Proctor modificada (Figura 33). Os corpos-de-prova foram removidos dos moldes e armazenados na câmara úmida por 7 (sete) dias. Após, as amostras foram submetidas a um esforço de compressão através da aplicação de carga contínua à velocidade de 0,25 MPa (Figura 34) até sua ruptura (Figura 35).

Figura 33 - Moldagem e compactação do CP



Figura 34 - Prensa hidráulica



Figura 35 - Corpo de prova após ruptura



Fonte: Autoria Própria (2019)

A resistência à compressão simples foi calculada dividindo-se a carga de ruptura pela seção transversal (DNER-ME 091/98), sendo o resultado expresso com aproximação de 10 kPa, conforme apresentado na Equação (3.6.1):

$$RCS = \frac{C}{A} * 0,1 \quad (3.6.1)$$

Onde:

RCS: resistência à compressão, em MPa;

C: carga de ruptura aplicada, em kgf;

A: área da seção transversal do corpo de prova (78,54 cm<sup>2</sup>), em cm<sup>2</sup>.

A resistência final foi calculada a partir da média dos 3 (três) valores para cada mistura.

### 3.7. Etapa 6: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral - RTCD

A determinação da resistência à tração por compressão diametral para as misturas com adição de cimento foi realizada conforme método de ensaio DNIT-ME 136/2018 (DNIT, 2018). Os corpos-de-prova foram moldados em triplicata, em forma cilíndrica com dimensões de 10,2 cm de diâmetro x 6,5 cm de altura, idênticas ao ensaio Marshall. A compactação foi realizada em uma única camada, na energia modificada, em suas duas faces, mesmo procedimento realizado no Marshall, para cura úmida de 7 e 28 dias.

No ensaio de RTCD, os corpos-de-prova foram inseridos no equipamento com sua face

cilíndrica entre dois frisos metálicos (Figura 36). Após, aplicou-se uma carga a uma velocidade de deformação constante de 0,8 mm/s até a ruptura por tração (Figura 37) e separação dos corpos de prova em duas metades (Figura 38).

Figura 36 - Ensaio de RTDC



Figura 37 - Ruptura do CP



Figura 38 - Detalhe separação em duas partes



Fonte: Autoria Própria (2019).

Para realização dos ensaios aos 7 dias de cura foi utilizada a prensa Marshal da marca Solotest, com anel dinamométrico com capacidade de 5.000 kgf, que determinou os valores de deformação do anel, sendo necessário o cálculo da força através da multiplicação pela constante Marshall de 1745,3 kgf/mm. Já o ensaio realizado aos 28 dias utilizou de célula de carga que registra automaticamente as cargas aplicadas até a ruptura.

O cálculo da resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme DNIT-ME 136/2018 e é dado pela equação (3.7.1):

$$\sigma_r = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times H} \quad (3.7.1)$$

Onde:

$\sigma_r$  – resistência à tração, em kgf/cm<sup>2</sup>;

F – carga de ruptura, em kgf;

d – diâmetro do corpo de prova, em cm;

h – altura do corpo de prova, em cm.

### 3.8. Etapa 7: Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral - MR

Os ensaios para determinação do módulo de resiliência foram realizados tendo em vista a importância do comportamento da mistura no dimensionamento do pavimento. Os ensaios seguiram a normativa DNIT 135/2010–ME (DNIT, 2010) e foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da UFSM a qual dispunha do equipamento apropriado. Segundo a referida norma, a relação entre a tensão de tração e a deformação específica recuperável representa o módulo de resiliência.

Como o ensaio de módulo de resiliência é não destrutivo, os mesmos corpos de prova foram utilizados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias. No entanto, moldou-se mais um corpo de prova para cada mistura para o rompimento à tração para determinação da magnitude da carga aplicada até a ruptura do CP no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral.

Foram realizados ensaios de MR em triplicata para cada mistura para cura de 28 dias. Os corpos de prova foram posicionados no pórtico e o ensaio foi realizado através de compressão diametral, com a aplicação de cargas cíclicas ao corpo de prova de 1 Hz por segundo, conforme Figura 39. A magnitude da carga aplicada foi de 30% da carga de ruptura obtida no ensaio de RTCD. As leituras de deslocamento foram realizadas com transdutor de deslocamentos do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*).

Figura 39 - Ensaio de Módulo de Resiliência na compressão diametral



Fonte: Laboratório UFSM (2020)

Dessa forma, a equação (3.8.1) determina o módulo de resiliência a partir dos dados obtidos do ensaio, conforme DNIT 135/2010–ME:

$$MR = \frac{CV}{\Delta h} \times (0,9976 \times \mu \times 0,2692) \quad (3.8.1)$$

Onde:

MR – módulo de resiliência, em kgf/cm<sup>2</sup>;

CV – carga vertical repetida aplicada diametralmente, em kgf;

$\Delta$  - deformação elástica, em cm;

$h$  - altura do corpo de prova;

$\mu$  – coeficiente de Poisson adotado de 0,20, conforme valores típicos indicados por Balbo (2007) para misturas cimentadas.

Cabe destacar que o módulo de resiliência está diretamente relacionado à rigidez da mistura, sendo que maiores ou menores valores são aceitáveis, dependendo da estrutura do pavimento. É importante salientar que os valores da resistência à tração e módulo de resiliência são primordiais no dimensionamento das camadas do pavimento quando métodos mecânicos são adotados, pois levam em consideração as tensões, deformações e o deslocamento das camadas estruturais.

Segundo Malysz (2009), o módulo de resiliência é um dos principais parâmetros na caracterização do comportamento mecânico dos agregados, quando empregados como camada estrutural de pavimentos.

### **3.9. Etapa 8: Dimensionamento das estruturas do pavimento**

Com o objetivo de se determinar as espessuras das camadas bem como analisar o comportamento das misturas recicladas como bases de pavimentos e a interação entre as camadas resultantes, procedeu-se o dimensionamento das estruturas do pavimento através do método da AASHTO e análises mecanicistas. Nas análises, foram utilizados como parâmetros os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral bem como módulo de resiliência.

O método da AASHTO foi empregado com a finalidade de se obter um pré-dimensionamento das espessuras das camadas estruturais do pavimento, que posteriormente,

foram submetidas a análises mecânicas realizadas através do programa computacional *Everstress*. Importante salientar que no software utilizado é necessário definir as espessuras iniciais das camadas a serem testadas para obtenção das tensões e deformações.

### *3.9.1. Etapa 8.1: Pré-dimensionamento das estruturas - Método da AASHTO*

O pré-dimensionamento contemplou uma estrutura composta de revestimento asfáltico, base da mistura reciclada com adição de cimento, objeto da pesquisa, e sub-base de macadame seco. Através da equação (2.6.1) foram calculados os números estruturais do pavimento (SN) para cada mistura estudada.

O valor utilizado para a serventia inicial  $p_0$  foi de 4,2, enquanto para a serventia terminal  $p_t$  foi de 2,5 para vias principais, conforme valores sugeridos pela AASHTO (1993).

Para o módulo de resiliência, os valores adotados para o revestimento, sub-base e subleito foram definidos de acordo com a norma técnica de pavimentação “IP-08: Análise mecânica à fadiga de estruturas do pavimento” - Norma IP-08/2004 da Prefeitura de São Paulo. Já para a base de material fresado com adição de cimento, os valores de MR foram obtidos dos ensaios de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral aos 28 dias descritos no item 3.8.

O nível de confiança adotado para o estudo foi de 85% valor intermediário considerado para vias arteriais principais – rurais, conforme Tabela 1. Para o desvio padrão  $S_0$  associado utilizou-se o valor de 0,45, tendo em vista que a AASHTO (1995) recomenda somente valores para pavimentos rígidos e flexíveis.

O coeficiente de equivalência estrutural do revestimento foi definido considerando o módulo de resiliência adotado conforme Norma IP-08/2004. Já para as camadas de base, os coeficientes foram calculados de acordo com os resultados obtidos para as resistências à compressão simples das misturas. Para a sub-base de macadame seco, utilizou-se o valor para o CBR intermediário. Devido ao caráter cimentante das estruturas propostas, o coeficiente de drenagem empregado foi igual a 1,0.

O número “N” da AASHTO de projeto adotado para o estudo foi de  $2,45 \times 10^6$  (DAER, 2016). O número N representa a quantidade de repetições da carga padrão, relativa ao eixo simples de rodas duplas de 8,2 tf, que o pavimento poderá receber ao longo de sua vida útil (DNIT, 2006a).

Para a determinação das espessuras das camadas foram utilizadas as equações (2.6.3), (2.6.4) e (2.6.5) respectivamente para o revestimento, base e sub-base.

Seguindo a metodologia, foram calculados os números estruturais necessários para a proteção das camadas, conforme equação (2.6.2) e as espessuras resultantes para cada mistura estudada. As espessuras obtidas para as camadas de pavimento através do método da AASHTO foram utilizadas como subsídio para as análises mecânicas.

### 3.9.2. Etapa 8.2: Análise mecânica das estruturas

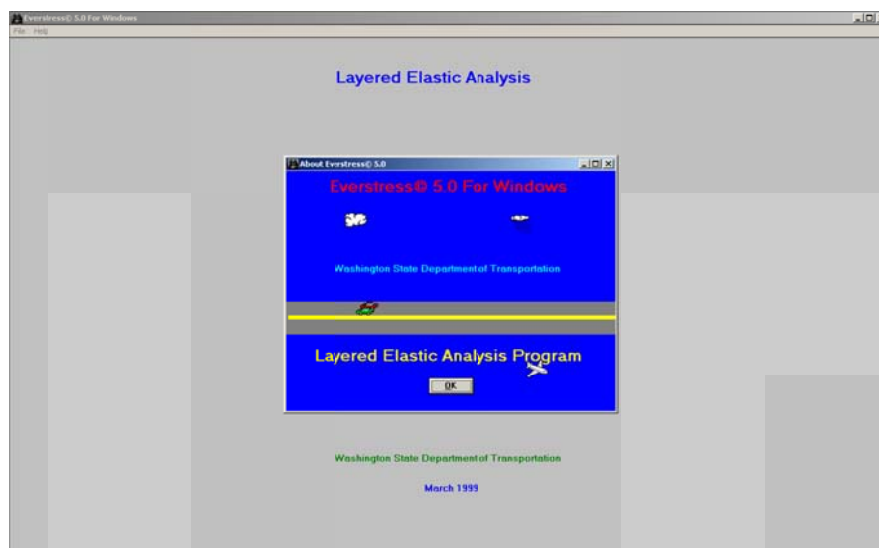
As estruturas pré-dimensionadas pelo método de AASHTO foram submetidas a análises mecânicas realizadas através do programa de análise elástica de múltiplas camadas *Everstress* e modelo de previsão de desempenho para bases cimentadas.

#### 3.9.2.1 Programa Everstress

A análise mecânica determina as tensões, deformações e deslocamentos através de programa computacional. No estudo, o software utilizado foi o *Everstress* versão 5.11 desenvolvido pelo Departamento de Transportes do Estado Norte Americano de Washington.

Com o uso do programa é possível determinar as tensões, deformações e deslocamentos em um sistema de camadas elásticas semi-infinitas (*Everseries*, 2005). O *Everstress* analisa as estruturas do pavimento contendo no máximo 5 (cinco) camadas, 20 (vinte) cargas atuantes e 50 (cinquenta) pontos de análise. A tela inicial do programa *Everstress* está apresentada na Figura 40:

Figura 40 - Tela Inicial Programa *Everstress*



Fonte: EVERSERIES (2005).

a) Parâmetros de entrada do programa

Os parâmetros de entrada para o cálculo das tensões estão apresentados nas telas do programa, conforme a Figura 41 e Figura 42.

Figura 41 - Tela de inserção de dados do *Everstress*

No	Layer ID	Interface Contact	Pois:son's Ratio	Thickness (cm)	Modulus (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1		1.00					
2		1.00					
3		1.00					
4							
5							

Fonte: Adaptado de Everseries (2005).

Figura 42 - Tela para inserção de dados de carregamentos

Fonte: Adaptado de Everseries (2005).

Os parâmetros estão especificados a seguir:



- Título;
- Número de camadas da estrutura do pavimento;
- Unidade de medida;

A identificação do módulo da camada é dada pela Tabela 6 enquanto a interface de contato é definida conforme Tabela 7. Na pesquisa foi considerado módulo do material constante, pois não foram realizados ensaios de MR para todos os materiais e adesão completa na interface das camadas.

Tabela 6 - Identificação do módulo da camada

Valor	Identificação da camada
0	Módulo do Material constante
1	Módulo do Material varia com o somatório das tensões principais
2	Módulo do Material varia com a Tensão Desvio

Fonte: Everseries (2005).

Tabela 7 - Interface de contato

Valor	Descrição
0	Deslizamento completo da camada
1	Adesão completa na interface das camadas
2	Deslizamento parcial

Fonte: Everseries (2005).

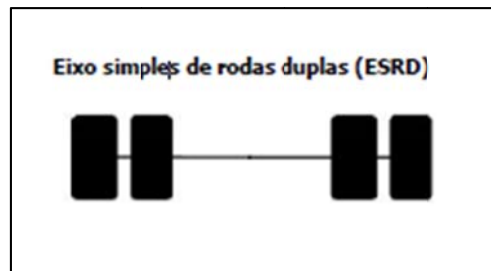
Os coeficientes de Poisson adotados foram de 0,30; 0,20; 0,40 e 0,45 para revestimento em CBUQ, base granular com adição de cimento, sub-base de macadame seco e solos respectivamente, adotados conforme recomendado por Medina e Motta (2015).

Quanto ao módulo de resiliência, os valores empregados foram os mesmos descritos no método da AASHTO.

#### b) Carregamentos considerados

Os carregamentos utilizados nas análises simularam o eixo padrão rodoviário, ou seja, o eixo simples de rodagem dupla (Figura 43).

Figura 43 - Eixo padrão rodoviário - ESRD



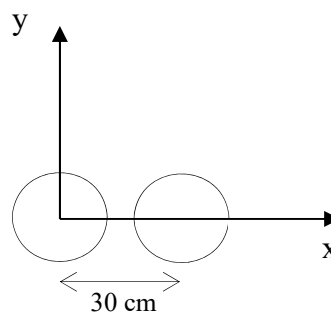
Fonte: DNIT (2007).

A pressão de inflação dos pneus considerada foi de 80 lb/Pol ou 560 kPa conforme DNER-ME 024/94 e o afastamento dos pneus de 30 cm (Everseries, 2005). As análises visaram verificar a tensão na face inferior da base cimentada, embaixo dos pneus e entre os pneus, pontos mais críticos onde irá romper por fadiga.

As verificações consideraram um semi-eixo, visto que as cargas de lados opostos do eixo não se sobrepõem em nenhuma das situações estudadas. A Figura 44 representa de forma esquemática as coordenadas das cargas e o afastamento para o semi-eixo considerado. As coordenadas dos centros das rodas são:

- x: 0,0, y: 0,0;
- x: 30 cm, y: 0,0.

Figura 44 - Representação esquemática do semi-eixo padrão



Fonte: Everseries (2005).

Demais dados inseridos no programa:

- número de cargas: 2, simulando os dois pneus para o eixo padrão (DNIT, 2006a);
- número de pontos de avaliação nos eixos x e y: 2;
- posição da carga nos eixos (tensões críticas):
  - Ponto 1: x: 0,00cm; y: 0,00 (embaixo dos pneus);

- Ponto 2: x: 15,00cm, y: 0,00cm (entre os pneus);
- magnitude da carga: 20.500 N, obtida dividindo-se a carga do eixo padrão de 8,2tf pelo número de rodas (DNIT, 2006a);
- raio da área carregada: calculado pelo programa.

### 3.9.2.2 Aplicação do modelo de previsão de desempenho

O modelo de previsão de desempenho ou fadiga utilizado foi o de Balbo (1993) para base de brita graduada tratada com cimento (BGTC), por mais se assemelhar ao material objeto do estudo. A equação referente ao modelo está descrita na revisão bibliográfica, item 2.6.3, equação (2.6.6).

Ao utilizar o modelo, as espessuras do revestimento e da sub-base foram mantidas de acordo com os resultados obtidos pelo Método da AASHTO, variando-se somente a espessura da camada de base até que a vida de fadiga estimada pelo modelo fosse superior ao número de passagens previstas para o número N.

O programa *Everstress* forneceu as tensões críticas atuantes na face inferior da base cimentada as quais foram utilizadas no modelo de previsão de desempenho para obtenção do número de passagens admissíveis no pavimento.

As espessuras das camadas de base para cada mistura foram obtidas comparando-se o número de passagens admissíveis com o número de passagens previstas do tráfego atuante no pavimento.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é destinado à apresentação e análise dos resultados da simulação em laboratório de reciclagem com adição de cimento do qual consta a análise granulométrica dos materiais, massa específica aparente seca máxima, umidade ótima e ISC, bem como a caracterização mecânica das misturas realizada através dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e dimensionamento das estruturas do pavimento.

### 4.1 Etapa 1 e 2: Caracterização e dosagem das misturas

A seguir, apresenta-se os percentuais passantes de material fresado em cada peneira obtidos através do ensaio de granulometria por peneiramento, bem como comparativo da granulometria do fresado com as faixas “I” e “II” da especificação DNIT 167/2013-ES, conforme pode ser observado na Tabela 8 e Figura 45.

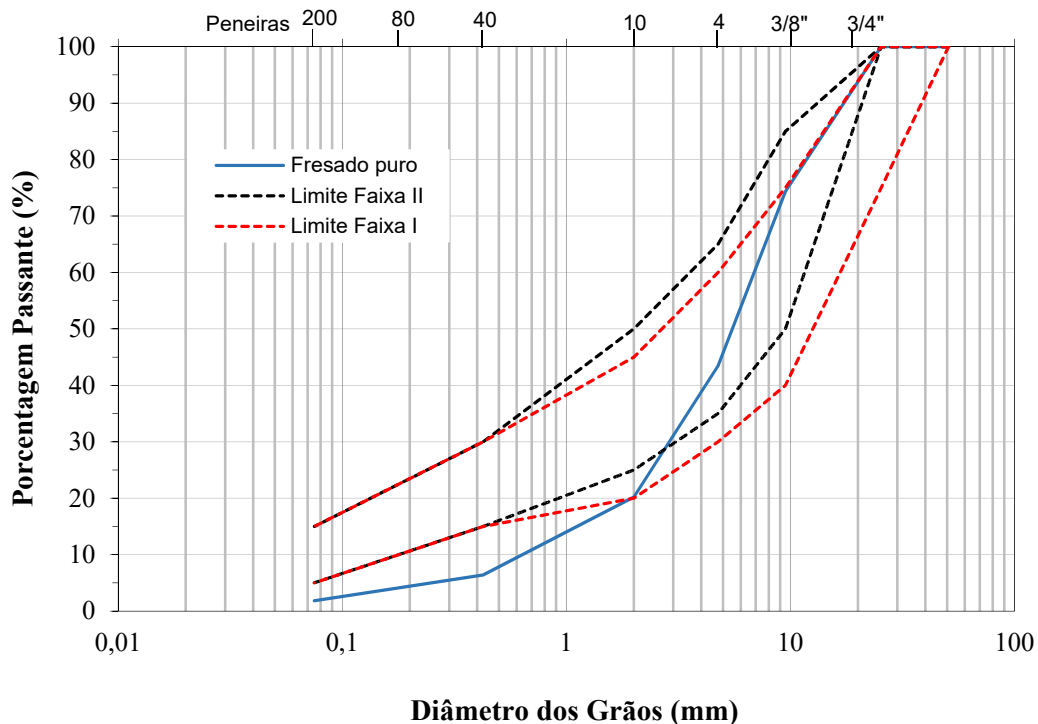
Tabela 8 - Comparativo da granulometria do material fresado com as Faixas “I” e “II” - DNIT 167/2013-ES

Peneiras		Material Fresado	% passante, em massa				Tolerância Faixa de projeto (%)
ABNT	Abertura		Faixa I		Faixa II		
2"	50,8	100,00	100	100	100	100	-
1"	25,4	100,00	75	90	100	100	+ - 7
3/8"	9,5	74,34	40	75	50	85	+ - 7
Nº 4	4,75	43,46	30	60	35	65	+ - 5
Nº 10	2	20,19	20	45	25	50	+ - 5
Nº 40	0,425	6,39	15	30	15	30	+ - 2
Nº 200	0,075	1,84	5	15	5	15	+ - 2

Fonte: Autoria Própria (2020)

De acordo com o Manual de Pavimentação DNIT (2006), os valores obtidos para o material fresado puro no ensaio de granulometria por peneiramento são característicos de solos de graduação grossa e pedregulhos, que de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) são denominados como grupo G. Já pela classificação TRB (*Transportation Research Board*) são chamados de grupos A-1 e A-2.

Figura 45 - Curva granulométrica do material fresado

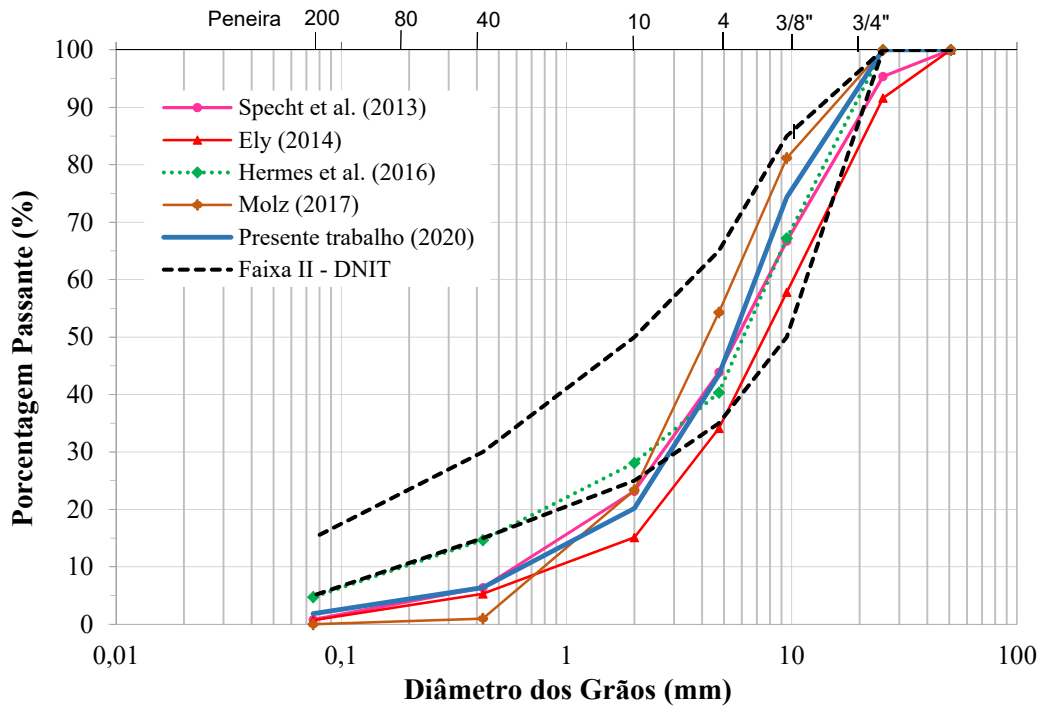


Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 45 pode ser observada a reduzida quantidade de finos do material fresado se comparado às faixas granulométricas “I” e “II” do DNIT, o que pode ser verificado nas peneiras de abertura nº 40 e 200 que apresentaram valores inferiores aos limites das faixas, sendo necessária a adição de outros materiais para sua estabilização. Tal fato pode ser explicado devido à aglomeração dos grãos mais finos ao material betuminoso, ocorrendo a formação de grumos, resultando em faixa relativamente grosseira na distribuição granulométrica do material fresado (Balbo, 2007).

A Figura 46 exprime as curvas granulométricas do material fresado apresentados nos estudos de Specht *et al.* (2013) Ely (2014), Hermes *et al.* (2016) e Molz (2017) abordados na revisão bibliográfica .

Figura 46 - Comparativo de curvas granulométricas do material fresado em outros estudos



Fonte: Autoria Própria (2020).

Comparando-se a curva granulométrica obtida nesta pesquisa com os estudos apresentados na Figura 46, fica evidenciada a necessidade de correção granulométrica para suprir a falta de finos observada nos materiais fresados asfálticos para o enquadramento nas faixas do DNIT. A estabilização granulométrica foi realizada de forma a atender a especificação para reciclagem profunda de pavimentos com adição de cimento - DNIT 167/2013-ES. A Tabela 9 apresenta os materiais estudados e suas respectivas granulometrias.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica dos materiais granulares pesquisados

PENEIRAS		% passante							
Tipo	Abertura (mm)	Areia fina	Areia industrial	Brita 0,1	Filler	Pedrisco 1/2"	Pedrisco 3/8"	Pedrisco 3/8" lascado	Pó fino
2"	50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	100,00	100,00	21,20	100,00	81,30	76,40	97,30	100,00
Nº 4	4,75	100,00	100,00	1,10	100,00	3,50	9,10	24,00	99,10
Nº 10	2	100,00	64,10	0,60	99,40	1,70	0,60	1,90	66,80

PENEIRAS		% passante							
Tipo	Abertura (mm)	Areia fina	Areia industrial	Brita 0,1	Filler	Pedrisco 1/2"	Pedrisco 3/8"	Pedrisco 3/8" lascado	Pó fino
Nº 40	0,425	97,60	28,40	0,40	79,60	1,60	0,50	1,70	26,20
Nº 200	0,075	1,10	16,60	0,30	43,90	1,40	0,50	1,60	15,00

Fonte: Autoria Própria (2020).

A partir dos materiais granulares disponíveis, foram procedidas as tentativas de ajustes das misturas dentro das faixas granulométricas “I” ou “II” estabelecidas pelo DNIT 167/2013 - ES, através da ferramenta da Microsoft Excel – Solver.

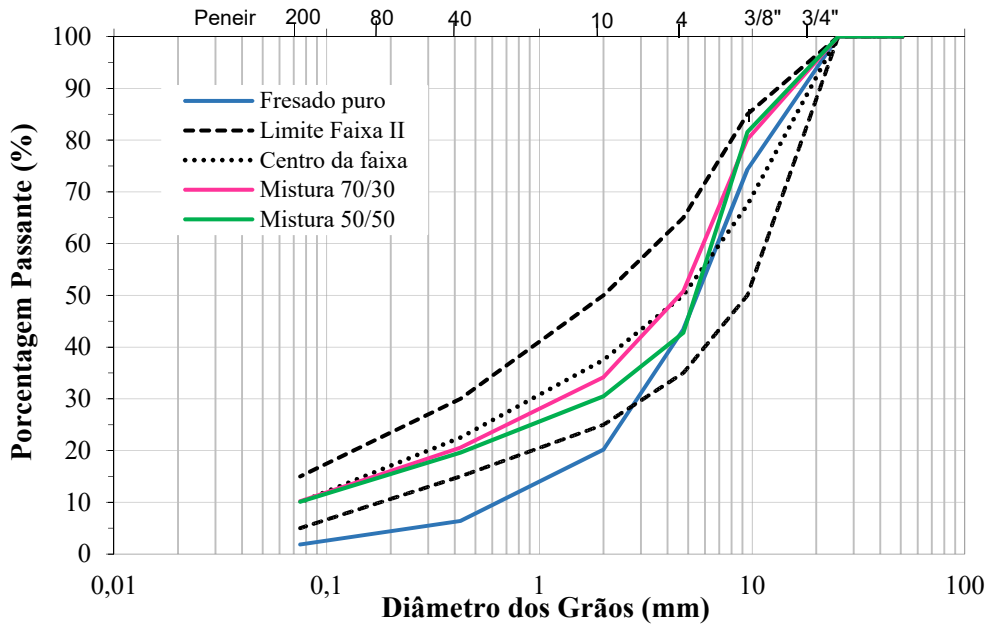
Na dosagem das misturas, foram definidos os percentuais de 50% e 70% de material fresado. A Tabela 10 e a Figura 47 apresentam os resultados obtidos para a mistura de 70% de material fresado e 30% agregados (10% pedrisco 1/2" + 20% filler) e a mistura de 50% de fresado e 50% agregados (30% pedrisco 1/2" + 20% filler), as quais se enquadraram na Faixa II do DNIT e atendem aos parâmetros da especificação DNIT 167/2013-ES quanto à granulometria das misturas.

Tabela 10 - Estabilização granulométrica do material fresado com adição de agregado virgem

Peneiras		% passante		Centro da faixa	Fresado puro	Mistura 70/30	Mistura 50/50
Tipo	Abertura (mm)	Limites faixa II					
2"	50,8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	50,00	85,00	67,50	74,34	80,16	81,56
Nº 4	4,75	35,00	65,00	50,00	43,46	50,77	42,78
Nº 10	2	25,00	50,00	37,50	20,19	34,18	30,49
Nº 40	0,425	15,00	30,00	22,50	6,39	20,55	19,59
Nº 200	0,075	5,00	15,00	10,00	1,84	10,21	10,12

Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 47 - Estabilização do fresado para as misturas 70/30 e 50/50

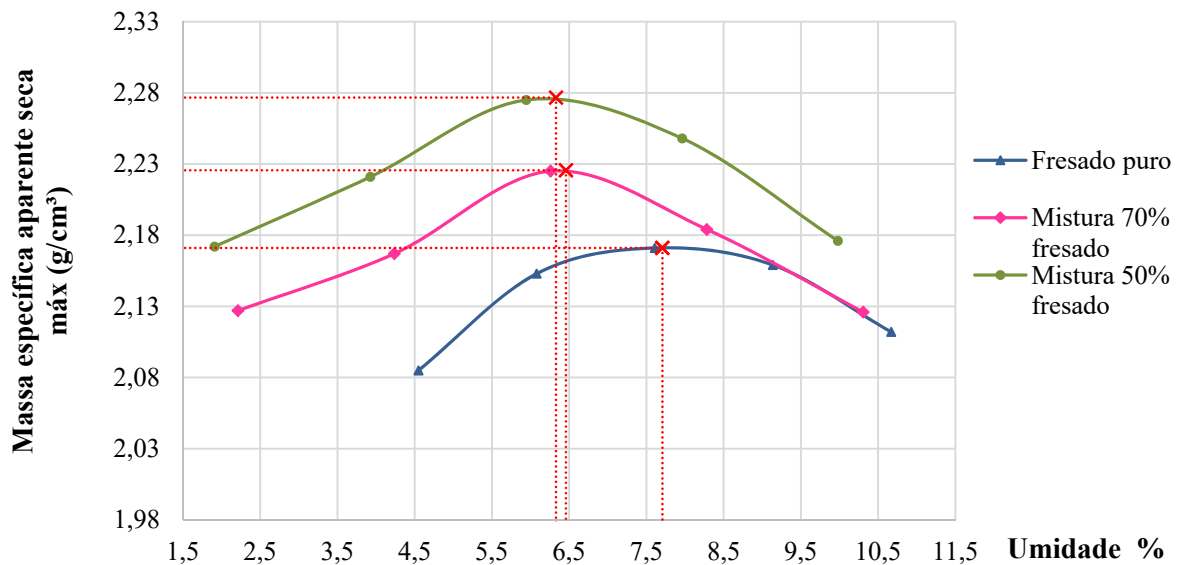


Fonte: Autoria Própria (2020).

#### 4.2. Etapa 3: Ensaios de compactação

Os resultados obtidos nos ensaios de compactação à energia modificada para amostra de fresado puro, para a mistura 70% fresado e 30% agregados e a mistura 50% fresado e 50% agregados são apresentados na Figura 48:

Figura 48 - Curvas de compactação



Fonte: Autoria Própria (2020).



Com base nas curvas de compactação (Figura 48), foi possível a determinação da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima, conforme resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros de compactação dos materiais

<b>Material</b>	<b>Massa específica aparente seca máxima (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade ótima h<sub>ót</sub> (%)</b>
Fresado puro	2,171	7,71
Mistura 70% fresado / 30% agregados	2,226	6,46
Mistura 50% fresado / 50% agregados	2,277	6,33

Fonte: Autoria Própria (2020)

Dos resultados obtidos no ensaio, pode-se perceber um aumento na massa específica aparente seca máxima e redução da umidade ótima das misturas à medida que se diminui o percentual de fresado, o que pode ser justificado pelo preenchimento dos vazios ocasionado pela adição de agregados virgens para correção granulométrica.

Os valores observados na revisão bibliográfica para as umidades ótimas do fresado puro variaram de 7,2 a 9,2%, sendo que o resultado desta pesquisa ficou dentro deste intervalo. Já a massa específica aparente seca máxima tanto do fresado como da mistura 70/30 resultou em valores coerentes com os de Silva (2012) e Specht *et al.* (2013), para a energia modificada.

Para a mistura 50/50, o estudo realizado por Fedrigo (2015) apresentou valores próximos a esta pesquisa para  $\gamma_{m\acute{a}x}$ , Já Gusmão (2008) obteve valores, o que pode ser justificado pela energia de compactação intermediária utilizada em seu estudo.

#### 4.3. Etapa 4: Ensaio de Índice de Suporte Califórnia - ISC

A partir dos valores obtidos para a umidade ótima nos ensaios de compactação, moldaram-se os corpos-de-prova em triplicata para realização dos ensaios de ISC para os materiais sem adição de cimento. A Tabela 12 demonstra os resultados obtidos no ensaio para ISC bem como expansão.

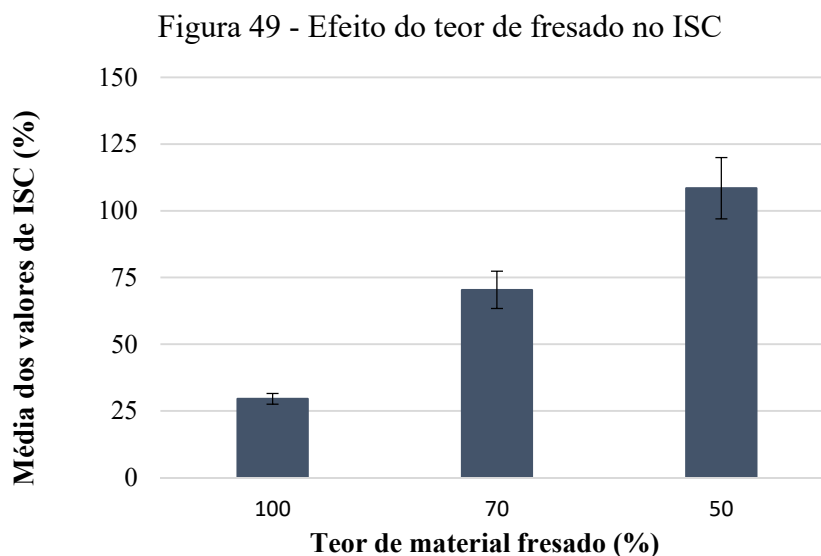
Tabela 12 - Resultados do Ensaio de ISC e Expansão

Material	Média		Desvio padrão	
	ISC (%)	Expansão (%)	ISC (%)	Expansão (%)
Fresado	29,44	0,00	1,79	0,00
Mistura 70/30	70,37	0,00	6,98	0,00
Mistura 50/50	108,47	0,00	11,47	0,00

Fonte: Autoria Própria (2020)

Dos resultados obtidos no ensaio (Tabela 12) pode-se verificar que o ISC da mistura 70/30 resultou em 2,4 vezes maior que o fresado puro, enquanto a mistura 50/50 obteve um aumento de aproximadamente 3,7 vezes, levando a concluir que quanto maior o percentual de fresado, menor a capacidade de desempenho da mistura. Ademais, pode-se inferir que a adição de *filler* e pedrisco ½” ao fresado puro promoveram o aumento da capacidade de suporte.

Ainda, não foi verificada expansão volumétrica dos materiais estudados, o que pode ser explicado devido às misturas não apresentarem argilominerais expansivos em sua composição, somente materiais granulares não permeáveis que impedem que a água seja absorvida. Segundo Bernucci *et al.* (2008) não há correlação entre os parâmetros de expansão com o ISC após a imersão do material em água, porém verifica-se uma tendência de que materiais com expansibilidade elevada resultem em baixa capacidade de suporte em contato com a água. Por isso, a expansibilidade dos materiais tem sido utilizada como fator limitante pelas especificações, cujos valores dependem da camada na qual os materiais serão utilizados na estrutura do pavimento. Na Figura 49 pode ser observado o efeito do teor de fresado nos resultados do ISC.



Fonte: Autoria Própria (2020)

Segundo as normas DNIT 139/2010 - ES e DNIT 141/2010 - ES, os resultados obtidos para o ISC e expansão do fresado puro atendem aos valores mínimos aceitos para utilização em camadas de sub-base de pavimentos, onde são indicados materiais com ISC acima de 20% e < 60% e expansão inferior à 1%.

A mistura 70/30 alcançou valores para capacidade de suporte e expansão que atendem aos requisitos da norma DNIT 141/2010 – ES que determina  $ISC \geq 60\%$  e  $< 80\%$  para utilização em camadas de base de pavimentos para número  $N \leq 5 \times 10^6$ , ou seja, para baixos volumes de tráfego, enquanto os resultados da mistura 50/50 confirmam a aplicabilidade tanto para número  $N \leq 5 \times 10^6$  quanto para  $N > 5 \times 10^6$  para  $ISC \geq 80\%$  e expansão  $\leq 0,5\%$ , podendo ser empregado em camadas com altos volumes de tráfego.

Dos estudos apresentados no Quadro 2 da revisão bibliográfica, o ISC do fresado asfáltico de Silva (2012) é o que mais se aproxima a esta pesquisa, sendo ambos os materiais viáveis para utilização somente em camadas de sub-base e reforço do subleito. Os ensaios de ISC das misturas 70/30 dos demais autores, resultaram em valores que variaram de 21,98% a 128%, o que pode ser justificado pelos materiais serem originados de fontes distintas, bem como pela energia utilizada no ensaio.

Pires (2014) obteve ISC de 68% para a mistura 70% fresado e 30% agregados virgens para a rodovia RS-509 e concluiu a utilização dos materiais em sub-bases e bases de pavimentos com baixo volume de tráfego. Os valores encontrados por Pires (2014) condizem com esta pesquisa. Salienta-se que os estudos contemplados na bibliografia que utilizaram o percentual de 50% de fresado não apresentaram ensaios de ISC, porém pode-se observar que os resultados de Hermes *et al.* (2013) para a mistura 70/30 indicaram valores de ISC semelhantes a este estudo com 50% de fresado, demonstrando o potencial de utilização em bases para alto volume de tráfego

#### **4.4. Etapa 5: Ensaio de resistência à compressão simples – RCS**

Os ensaios de resistência à compressão simples seguiram o preconizado no Método de Ensaio DNER-ME 091/98. Após a execução dos ensaios, calculou-se a média aritmética das resistências correspondentes a um mesmo percentual de fresado e teor de cimento. Os resultados da RCS para as misturas estudadas para 7 dias de cura estão apresentados na Tabela 13. Os valores individuais obtidos situaram-se dentro do intervalo da média mais ou menos o desvio padrão. Os valores da RCS variaram de 2,27 a 3,30 MPa.

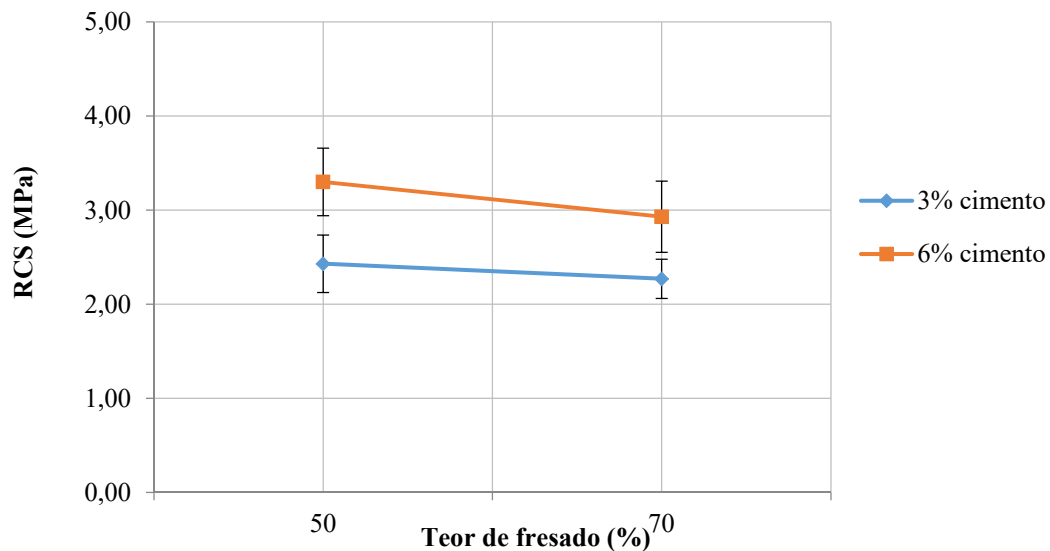
Tabela 13 - Resultados da resistência à compressão simples nas misturas

Mistura	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
70/30 - 3% cimento	2,27	0,21
70/30 - 6% cimento	2,93	0,38
50/50 - 3% cimento	2,43	0,31
50/50 - 6% cimento	3,30	0,36

Fonte: Autoria Própria (2020)

Na Figura 50 são apresentados os resultados da resistência à compressão simples aos 7 dias em função do percentual de fresado e o teor de cimento das misturas.

Figura 50 - Relação teor de fresado e cimento x RCS nas misturas

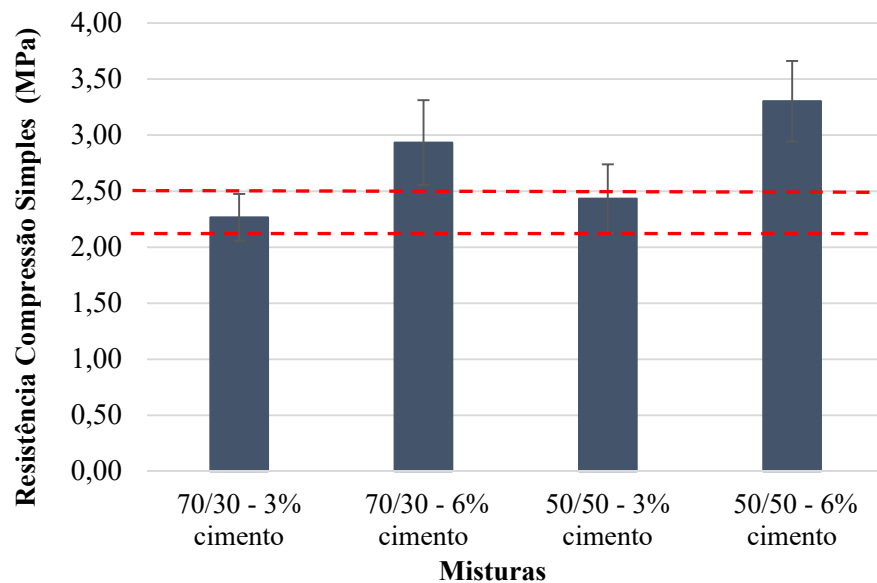


Fonte: Autoria Própria (2020)

Analisando a Figura 50, pode-se afirmar que quanto maior o percentual de material fresado na mistura para um mesmo teor de cimento, menor a resistência à compressão. Ademais, pode-se constatar que o aumento do percentual de cimento, gerou um acréscimo de resistência de 29% para a mistura 70/30 e de 36% para a mistura 50/50, demonstrando ganho de resistência para maiores teores de cimento.

A Figura 51 apresenta o comparativo dos resultados obtidos para a RCS para as misturas estudadas com relação aos parâmetros da especificação de serviço DNIT 167/2013-ES.

Figura 51 - Comparativo de resultados resistência compressão simples (RCS)



Fonte: Autoria Própria (2020).

De acordo com especificação, a RCS aos 7 dias para as misturas recicladas com adição de cimento deve resultar entre 2,1 e 2,5 MPa. Analisando a Figura 51, o teor de cimento que conduziu tanto a mistura 70/30 quanto a mistura 50/50 a resistências de acordo com a especificação foi o de 3%. Ainda, observa-se que as misturas com 6% de cimento alcançaram valores superiores ao estabelecido na norma, para ambos os percentuais de fresado estudados.

Os valores da resistência à compressão aos 7 dias verificados por outros autores na revisão bibliográfica, item 2.4.2, variaram de 0,38 a 5,65 MPa, o que pode ser explicado pelo emprego de diferentes percentuais de fresado, material de base, teores de cimento e energia de compactação utilizados pelos autores. As RCS mais baixas podem ser percebidas nas misturas com maiores percentuais de fresado asfáltico e menores teores de cimento, do mesmo modo que as máximas resistências à compressão ficam evidenciadas nas misturas com menor utilização de fresado e maiores teores de cimento, fato comprovado nesta pesquisa.

Comparando-se os resultados obtidos para RCS das misturas com 70% de material fresado com outros autores, observa-se que os valores de Specht *et al.* (2013), Silva (2014) e Pires (2014) aos 7 dias, mesmo para maiores teores de cimento foram bem inferiores aos encontrados nesta pesquisa, não resultando em resistências satisfatórias. Ely (2014) considerou a adição de 4% de cimento para a mistura com 70% de fresado e obteve RCS de 2,51 MPa aos 7 dias, resultado que mais se aproximou a este estudo.

Gusmão (2008) estudou a mistura composta de 50% de material fresado com adição de 3% de cimento, no entanto, os valores observados foram inferiores aos desta pesquisa, possivelmente devido a utilização da energia intermediária nos ensaios de compactação.

A RCS da mistura 50% de fresado e 6% de cimento aos 7 dias observada neste estudo foi de 3,30MPa, enquanto o estudo de Fedrigo (2015) verificou a resistência de 4,98MPa. Os valores encontrados pelo autor foram superiores, principalmente se levarmos em conta a energia de compactação utilizada. Ainda, observa-se que as misturas com 50% de fresado estudadas pelo mesmo também resultaram em valores acima aos limites definidos na especificação DNIT 167/2013-ES para RCS aos 7 dias para todos os percentuais de cimento testados, mesma tendência observada nesta pesquisa.

#### 4.5. Etapa 6: Ensaios de resistência à tração por compressão diametral - RTCD

O ensaio de RTCD foi realizado de acordo com a norma DNIT 136/2018 – ME. Os ensaios aos 7 dias de cura foram realizados através de prensa com anel dinamométrico, que determinou os valores da deformação do anel, sendo necessários determinar a força aplicada, conforme Tabela 14.

Tabela 14 - Determinação da RTCD – 7 dias

Mistura	CP	Alt (cm)	Diâmetro (cm)	Leitura ( $\mu\text{m}$ )	K (kgf/mm)	F (kgf)	Rt (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rt (MPa)
70/30	3%	1	6,9	10,0	193,0	1745,3	336,84	0,30
70/30	3%	2	6,9	10,0	182,0	1745,3	317,64	0,29
70/30	3%	3	7,0	10,0	213,0	1745,3	371,75	0,33
70/30	6%	1	7,3	10,0	374,0	1745,3	652,74	0,56
70/30	6%	2	7,4	10,0	380,0	1745,3	663,21	0,56
70/30	6%	3	7,4	10,0	338,0	1745,3	589,91	0,50
50/50	3%	1	7,1	10,0	249,0	1745,3	434,58	0,38
50/50	3%	2	7,0	10,0	204,0	1745,3	356,04	0,32
50/50	3%	3	7,2	10,0	234,0	1745,3	408,40	0,35
50/50	6%	1	7,4	10,0	421,0	1745,3	734,77	0,62
50/50	6%	2	7,5	10,0	420,0	1745,3	733,03	0,61
50/50	6%	3	7,6	10,0	438,0	1745,3	764,44	0,63

Fonte: Autoria própria (2020).

A Tabela 15 apresenta a média das resistências à tração por compressão diametral e desvio padrão obtidas para 7 dias de cura. Os valores individuais das RTCD aos 7 dias situaram-se dentro do intervalo da média mais ou menos o desvio padrão.

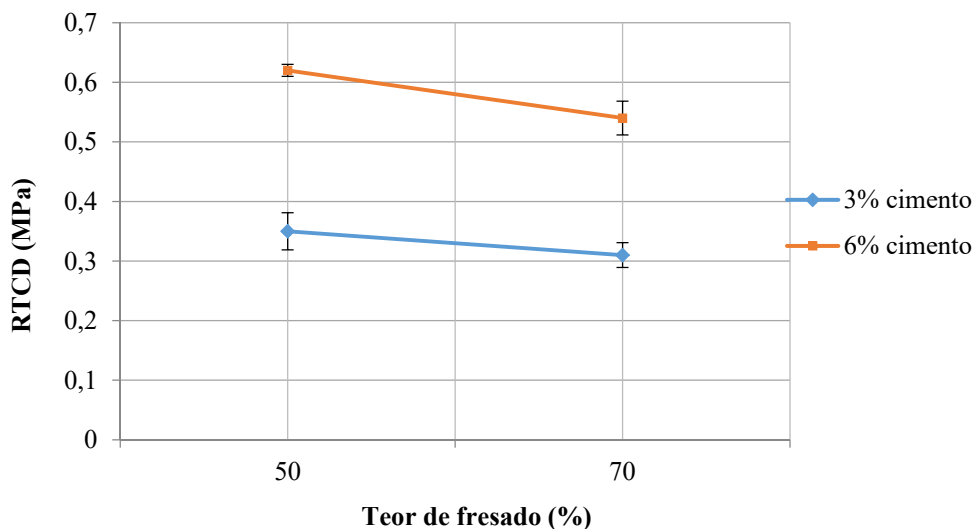
Tabela 15 - Resultados Resistência Tração por Compressão Diametral – 7 dias

Mistura	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
70/30 - 3% cimento	0,31	0,02
70/30 - 6% cimento	0,54	0,03
50/50 - 3% cimento	0,35	0,03
50/50 - 6% cimento	0,62	0,01

Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Tabela 15 é possível verificar que os valores das resistências aumentam à medida que se reduz o percentual de fresado para mesmos teores de cimento, da mesma forma que foi verificado nos ensaios de RCS. Ainda, observa-se que as misturas com adição de 6% de cimento obtiveram um incremento superior à 70% quando comparadas às misturas com 3% de cimento para mesmos teores de fresado, demonstrando a influência do percentual de cimento nas misturas (Figura 52).

Figura 52 - Relação teor de fresado e cimento x RTCD – 7 dias



Fonte: Autoria Própria (2020)

Além disso, verifica-se que os resultados encontrados nos ensaios para as misturas com teor de 3% de cimento aos 7 dias estão de acordo com os limites estabelecidos pela

especificação DNIT 167/2013-ES, que recomenda os valores entre 0,25 e 0,35 MPa. Já as misturas com adição de 6% de cimento demonstraram valores acima do limite especificado na norma para ambos percentuais de fresado.

Também foram realizados ensaios de RTCD aos 28 dias de cura, os quais foram realizados através de célula de carga, com registro automático das cargas aplicadas até a ruptura. A Tabela 16 apresenta a média das resistências à tração por compressão diametral e desvio padrão obtidas para 28 dias de cura.

Tabela 16 - Resultados Resistência Tração por Compressão Diametral – 28 dias

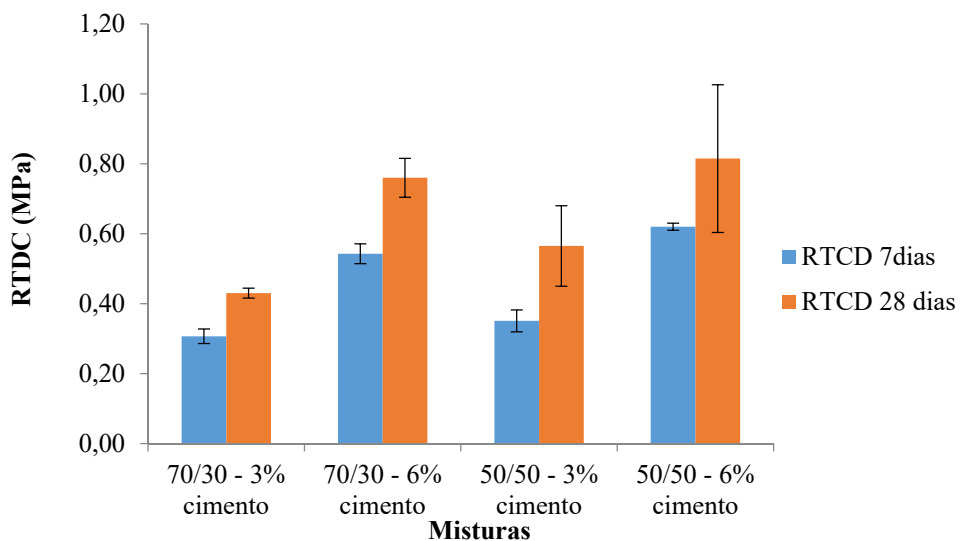
Mistura	Média CPs (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Espúrio (MPa)	Média (MPa)
70/30 - 3% cimento	0,43	0,01	-	0,43
70/30 - 6% cimento	0,76	0,06	-	0,76
50/50 - 3% cimento	0,50	0,12	0,37	0,57
50/50 - 6% cimento	0,94	0,21	1,18	0,82

Fonte: Autoria Própria (2020).

O CP2 referente à mistura 70/30 com adição de 3,0% de cimento aos 28 dias rompeu no ciclo de condicionamento do ensaio de MR, por isso ficou sem resultados.

Os resultados individuais obtidos para a RTCD das misturas aos 28 dias que se situaram fora do intervalo da média mais ou menos o desvio padrão foram avaliados como espúrio e não foram considerados no cálculo da média das resistências. A Figura 53 apresenta o comparativo dos resultados dos ensaios para os tempos de cura de 7 e 28 dias.

Figura 53 - Comparativo RTCD aos 7 e 28 dias



Fonte: Elaboração Própria (2020).



Analisando a Figura 53, pode-se inferir que aos 7 dias de cura obteve-se em média 70% dos valores de RTCD alcançados aos 28 dias. Em termos comparativos, os valores obtidos dos 7 para os 28 dias de cura resultaram em aumentos significativos de resistências à tração em média de 30% nas misturas, demonstrando ganhos de resistência a maiores períodos de cura.

Ainda, é possível evidenciar o aumento das resistências à tração quanto maior o tempo de cura, maiores teores de cimento e menor percentual de fresado nas misturas. Essa tendência também foi citada nas pesquisas de Gusmão (2008), Ely (2014) e Fedrigo (2015) que observaram comportamentos semelhantes em seus estudos.

No Quadro 2 da revisão bibliográfica podem ser observados os resultados da RTCD obtidos por outros autores, para diferentes porcentagens de fresado, materiais de base utilizados na composição das misturas, teor de cimento, tempo de cura, bem como energia de compactação.

No estudo realizado por Silva (2014) para 70% de fresado e 5,37% de cimento, o autor verificou os valores de 0,22 MPa para 7 dias e 0,34MPa aos 28 dias de cura úmida, à energia modificada, resultados bem inferiores a esta pesquisa.

Gusmão (2008) verificou a RTCD de 0,39 MPa aos 28 dias de cura para mistura 50% de fresado e 3% de cimento, resultado similar a este estudo para 28 dias de cura. Fedrigo (2015) obteve aos 7 dias, valores de 0,51MPa para energia intermediária, se aproximando aos resultados desta pesquisa obtidos para a energia modificada.

Na Tabela 17 apresenta-se a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples aos 7 dias, resultando em média 0,14 para as misturas com adição de 3% de cimento e 0,18 para as misturas com 6% de cimento.

Tabela 17 - Relação RTCD/RCS – 7 dias

<b>Mistura</b>	<b>RCS (MPa)</b>	<b>RTCD (MPa)</b>	<b>RTCD/RCS</b>
70/30 - 3% cimento	2,27	0,31	0,14
70/30 - 6% cimento	2,93	0,54	0,18
50/50 - 3% cimento	2,43	0,35	0,14
50/50 - 6% cimento	3,3	0,62	0,19

Fonte: Autoria Própria (2020)

Analisando a Tabela 17, percebe-se que relações RTCD/RCS semelhantes foram verificadas para as misturas com mesmos percentuais de cimento estudados. Ademais,

verifica-se que as maiores relações foram observadas para as misturas com maior teor de cimento.

Trichês *et al.* (2013) encontraram relação RTCD/RCS entre 0,20 e 0,30, valores acima dos calculados conforme pode ser verificado na Tabela 17. Silva (2014), para 7 e 28 dias de cura, obteve os valores de 0,16 e 0,13, respectivamente. Já Fedrigo (2015) verificou em média a relação de 0,18, com limites de 0,14 e 0,25. Se levarmos em consideração os valores estabelecidos na especificação de serviço DNIT 167/2013 – ES para RCS e RTCS aos 7 dias, a relação calculada entre os limites é de 12% a 14%, obtidos nessa pesquisa para as misturas com adição de 3% cimento, enquanto as misturas com 6% de cimento, resultaram em valores superiores.

#### 4.6. Etapa 7: Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral - MR

Os valores médios obtidos no ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral estão apresentados na Tabela 18. O CP2 referente à mistura 70/30 com adição de 3,0% de cimento rompeu no ciclo de condicionamento e, por isso, ficou sem resultados. Os valores de MR individuais que se situaram fora do intervalo da média mais ou menos o desvio padrão foram avaliados como espúrio e não foram considerados no cálculo da média das resistências (Tabela 18).

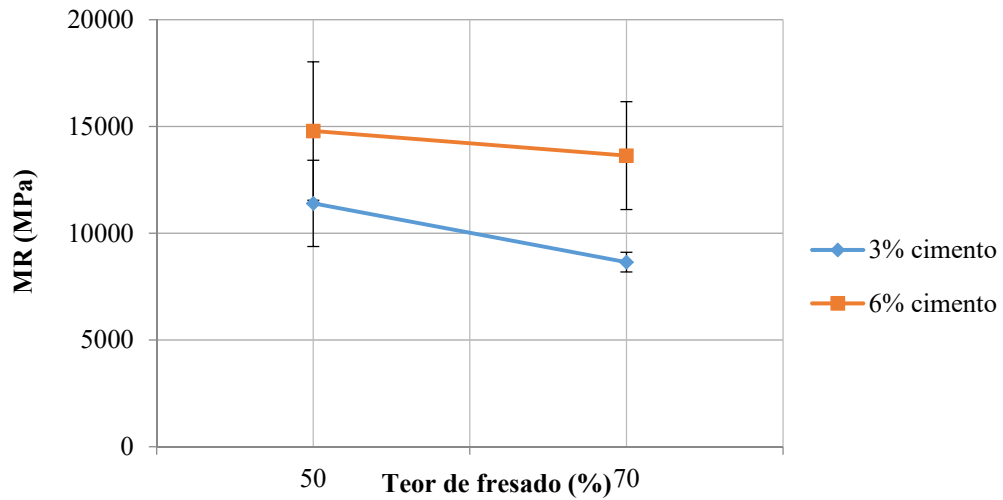
Tabela 18 - Módulo de Resiliência à compressão diametral aos 28 dias

Mistura	Média CPs (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Espúrio (MPa)	Média (MPa)
70/30 - 3% cimento	8.648	461	-	8.648
70/30 - 6% cimento	12.258	2.526	9.502	13.637
50/50 - 3% cimento	10.328	2.021	8.179	11.403
50/50 - 6% cimento	16.652	3.243	20.374	14.791

Fonte: Autoria Própria (2020)

Na Figura 54 são apresentados os resultados de MR aos 28 dias em função do percentual de fresado e do teor de cimento das misturas.

Figura 54 - Relação teor de fresado e cimento x MR – 28 dias



Fonte: Autoria Própria (2020)

Da Figura 54 pode-se verificar que as misturas com maior teor de fresado para mesmos percentuais de cimento apresentaram menores módulos de resiliência. Além disso, observa-se o aumento dos valores de MR para maiores teores de cimento, demonstrando ganho de rigidez. Essas tendências também foram observadas nos ensaios de resistência mecânica.

Os resultados obtidos nesta pesquisa para MR variaram de 8.648 a 14.791 MPa, valores que se encontram dentro das faixas de módulo de resiliência para bases cimentadas sugeridos pela Prefeitura de São Paulo (2004) e Balbo (2007), que apresentam valores entre 5.000 e 15.000 MPa.

Silva (2014) obteve o valor de 7.070 MPa para o MRD aos 28 dias para o teor de 5,7% de cimento na energia modificada, resultados inferiores aos obtidos neste estudo para as misturas para as misturas com 70% de material fresado. Já Ely (2014) verificou módulo de 8.420 MPa aos 14 dias de cura para 4% de cimento à energia modificada, próximo ao encontrado neste estudo para 3% de cimento.

As misturas pesquisadas por Fedrigo (2015) com 50% de fresado apresentaram MR bem elevados, variando de 18.198 MPa a 21.447 MPa para adição de 2% e 4% de cimento respectivamente, resultados superiores aos verificados neste estudo e descritos por Balbo (2007).

## 4.7. Etapa 8: Dimensionamento das estruturas do pavimento

### 4.7.1. Etapa 8.1: Pré-dimensionamento do pavimento - Método da AASHTO

As estruturas preliminares do pavimento foram definidas pelo método de dimensionamento da AASHTO e, posteriormente, verificadas através de modelo empírico-mecanístico.

Seguindo a metodologia e parâmetros especificados no item 3.9.1, os números estruturais - SN foram calculados de acordo com a equação (2.6.1).

A Tabela 19 apresenta os valores adotados para o módulo de resiliência do revestimento, sub-base e subleito que foram definidos de acordo com a norma técnica de IP-08/2004. Os valores de MR utilizados para a base foram obtidos dos ensaios de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral aos 28 dias, apresentados no item 4.6.

Tabela 19 - Módulo de Resiliência adotado

Camada	MR (MPa)
Revestimento	4.000
Base mistura 70/30- 3% cimento	8.648
Base mistura 70/30- 6% cimento	13.637
Base mistura 50/50- 3% cimento	11.403
Base mistura 50/50- 6% cimento	14.791
Sub-base Macadame seco	350
Subleito	100

Fonte: Autória Própria (2020).

Os coeficientes de equivalência estrutural foram estabelecidos conforme Tabela 20. Para o revestimento, considerando o módulo de resiliência de 4.000 MPa, foi adotado o valor de 0,45. Já para as camadas de base, os coeficientes foram calculados de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples. Para a sub-base de macadame seco, utilizou-se o valor intermediário de 0,12.

Tabela 20 - Coeficientes de equivalência estrutural adotados para as camadas de base cimentada

Mistura	RCS 7dias	a
70/30 – 3% cimento	2,27 Mpa	0,15
70/30 – 6% cimento	2,93 Mpa	0,15

<b>Mistura</b>	<b>RCS 7dias</b>	<b>a</b>
50/50 – 3% cimento	2,43 Mpa	0,15
50/50 – 6% cimento	3,30 Mpa	0,17

Fonte: Aatoria Própria (2020).

Os números estruturais - SN necessários para proteção do subleito, sub-base e base estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Número Estrutural necessário para proteção das camadas

<b>Camada</b>	<b>SN</b>
Base mistura 70/30- 3% cimento	0,96
Base mistura 70/30- 6% cimento	0,82
Base mistura 50/50- 3% cimento	0,87
Base mistura 50/50- 6% cimento	0,79
Sub-base Macadame seco	2,30
Subleito	3,10

Fonte: Aatoria Própria (2020)

As espessuras das camadas foram determinadas de acordo as equações (2.6.3), (2.6.4) e (2.6.5), respectivamente para o revestimento, base e sub-base. As espessuras resultantes para as estruturas pré-dimensionadas pelo método da AASHTO são apresentadas na Tabela 22 e Tabela 23:

Tabela 22 - Estrutura preliminar do pavimento– Método da AASHTO – Mistura 70/30

<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>
Revestimento	6,0	Revestimento	5,0
Base Mistura 70/30 - 3%	22,0	Base Mistura 70/30 - 6%	24,0
Sub-base	16,0	Sub-base	16,0
Subleito	∞	Subleito	∞

Fonte: Aatoria Própria (2020).

Tabela 23 - Estrutura preliminar do pavimento– Método da AASHTO – Mistura 50/50

<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>
Revestimento	5,0	Revestimento	4,0
Base Mistura 50/50 - 3%	25,0	Base Mistura 50/50 - 6%	24,0
Sub-base	16,0	Sub-base	16,0
Subleito	∞	Subleito	∞

Fonte: Aatoria Própria (2020).

Na Tabela 22 e Tabela 23 apresenta-se a estrutura preliminar do pavimento dimensionada pelo método da AASHTO, onde é possível observar espessuras semelhantes para as camadas de base com adição de cimento estudadas, exceto a mistura 70/30 com 3% cimento. Essa mistura resultou na menor espessura da camada de base, no entanto fica evidenciado o aumento da camada de revestimento quando comparado às demais misturas. Já a base da mistura 50/50 com adição de 6% de cimento foi a que gerou as menores espessuras para a camada de revestimento.

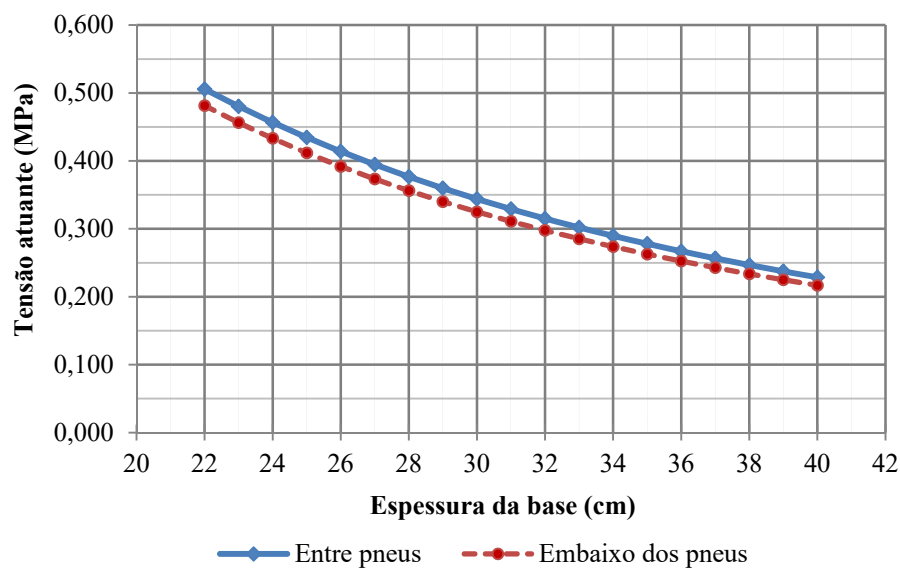
As espessuras das camadas resultantes do dimensionamento pelo método da AASHTO foram fornecidas ao programa *Everstress* para realização da análise mecânicas.

#### 4.7.2. Etapa 8.2: Análise Mecânica das Estruturas

Partindo da estrutura preliminar determinada pela AASHTO (Tabela 22 e Tabela 23), as análises mecânicas foram realizadas utilizando-se o programa *Everstress* variando-se as espessuras das camadas de base até que a vida de fadiga estimada pelo modelo fosse superior ao número de passagens previstas, de forma a atender o modelo de fadiga.

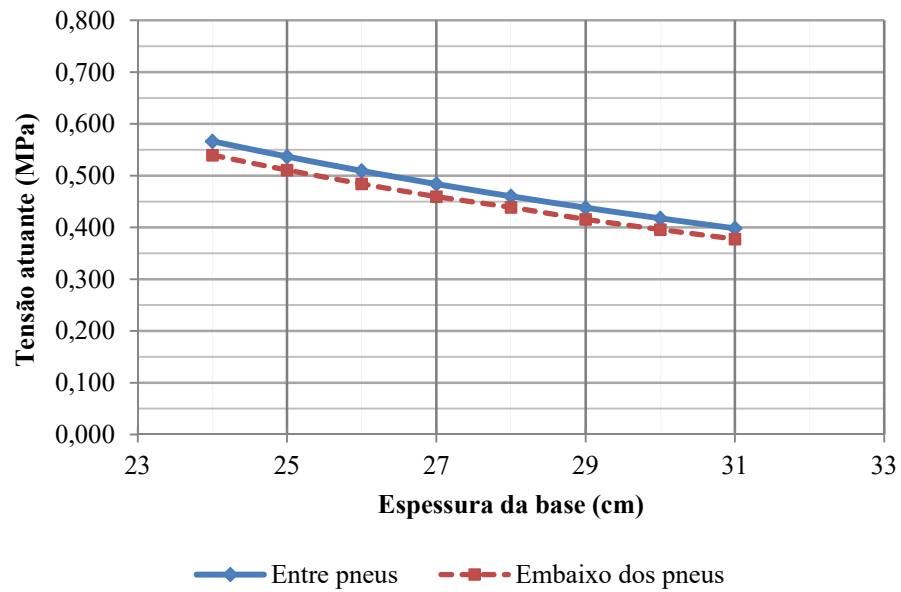
Na Figura 55 a Figura 58 estão apresentadas as tensões atuantes calculadas pelo programa *Everstress* à medida que se aumenta a espessura da camada de base, para cada mistura estudada. As análises foram realizadas considerando-se as tensões entre pneus e embaixo dos pneus, na face inferior da base cimentada.

Figura 55 - Tensão atuante x espessura – mistura 70/30 3% cimento



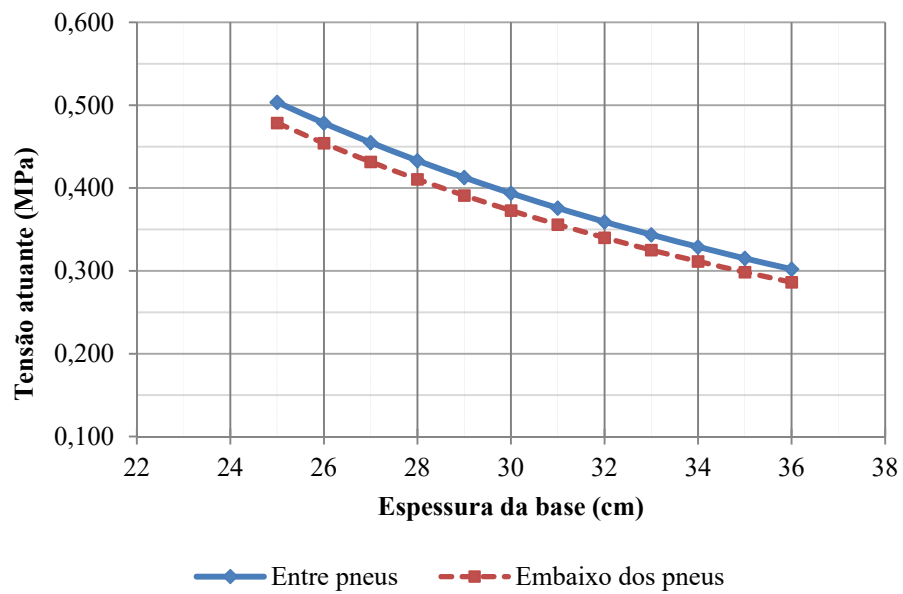
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 56 - Tensão atuante x espessura – mistura 70/30 6% cimento



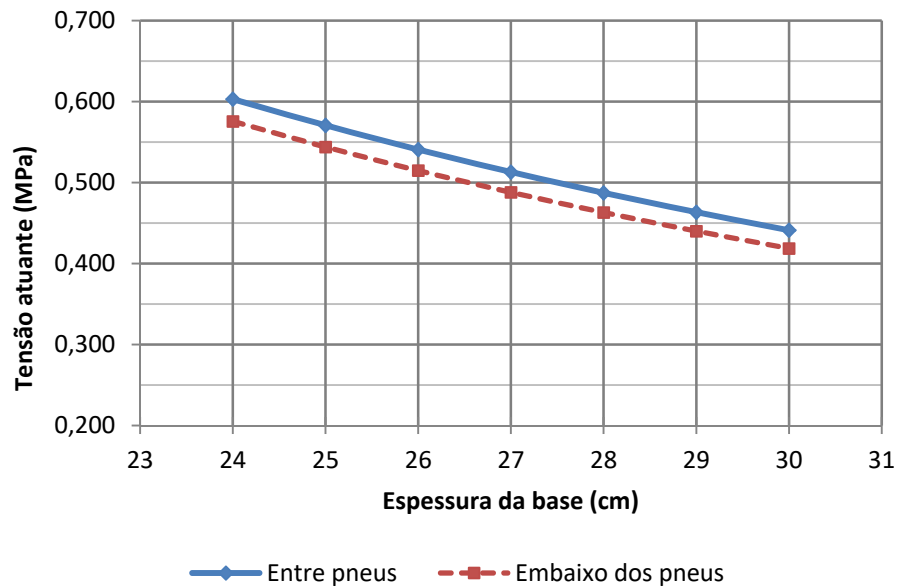
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 57 - Tensão atuante x espessura – mistura 50/50 3% cimento



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 58 - Tensão atuante x espessura – mistura 50/50 - 6% cimento



Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Figura 55 a Figura 58 é possível observar que as tensões diminuem à medida que se aumenta a espessura da camada de base das misturas, o que pode ser verificado devido à atenuação das tensões para maiores espessuras ao longo das camadas. Além disso, percebe-se que as tensões atuantes embaixo dos pneus são menores se comparadas às tensões entre os pneus, levando a inferir que as tensões críticas ocorreram entre os pneus, ponto de aplicação onde há sobreposição das tensões de cada pneu e ocorrerá menor vida de fadiga.

O comportamento das tensões críticas (entre os pneus) x espessura da base para as misturas 70/30 – 3% cimento, 70/30 – 6% cimento, 50/50 – 3% cimento e 50/50 – 6% de cimento, pode ser verificado nas equações (4.7.2.1) a (4.7.2.4), respectivamente:

$$y = 0,0005x^2 - 0,0441x + 1,2458 \quad (4.7.2.1)$$

$$R^2 = 0,9996$$

$$y = 0,0009x^2 - 0,0712x + 1,7793 \quad (4.7.2.2)$$

$$R^2 = 1,000$$

$$y = 0,0006x^2 - 0,0548x + 1,4971 \quad (4.7.2.3)$$

$$R^2 = 0,9999$$

$$y = 0,001x^2 - 0,083x + 1,9983 \quad (4.7.2.4)$$

$$R^2 = 1,000$$



Onde:

$x$  = Espessura da base, em cm;

$y$  = Tensão na base, em MPa.

A verificação à fadiga no modelo foi realizada através do comparativo entre o número N de projeto e o número N calculado para cada espessura através da (2.6.6). O número “N” de aplicações equivalentes ao eixo padrão adotado na pesquisa foi de  $2,45 \times 10^6$  (DAER, 2016).

A Tabela 24 a Tabela 27 apresentam as tensões críticas (entre os pneus) à medida que a espessura da base foi aumentada, bem como os resultados da aplicação do modelo de fadiga de Balbo (1993).

Tabela 24 - Tensões críticas e aplicação do modelo de fadiga - mistura 70/30 - 3% cimento

<b>Espessura base (cm)</b>	<b>Tensão crítica (MPa)</b>	<b>RT</b>	<b>Nf</b>
22	0,506	1,176	1,193E-06
23	0,480	1,117	1,715E-05
24	0,457	1,062	2,054E-04
25	0,435	1,011	2,083E-03
26	0,414	0,963	1,812E-02
27	0,395	0,918	1,369E-01
28	0,377	0,876	9,081E-01
29	0,360	0,837	5,350E+00
30	0,344	0,800	2,820E+01
31	0,329	0,765	1,344E+02
32	0,315	0,733	5,833E+02
33	0,302	0,702	2,318E+03
34	0,290	0,674	8,505E+03
35	0,278	0,646	2,893E+04
36	0,267	0,621	9,193E+04
37	0,257	0,597	2,737E+05
38	0,247	0,574	7,675E+05
39	0,237	0,552	2,038E+06
40	0,229	0,532	5,129E+06
RTCD (Mpa):	0,43		
$\sigma_t$ (MPa):	0,229		
Número N:	5,129E+06	$\geq 2,46E+06$	

Tabela 25 - Tensões críticas e aplicação do modelo de fadiga - mistura 70/30 - 6% cimento

<b>Espessura base (cm)</b>	<b>Tensão crítica (MPa)</b>	<b>RT</b>	<b>Nf</b>
24	0,566	0,745	3,345E+02
25	0,537	0,706	1,939E+03
26	0,509	0,670	9,900E+03
27	0,484	0,637	4,495E+04
28	0,460	0,605	1,838E+05
29	0,438	0,576	6,819E+05
30	0,418	0,549	2,317E+06
31	0,398	0,524	7,263E+06
RTCD (Mpa):	0,76		
$\sigma_t$ (MPa):	0,398		
Número N:	7,263E+06	$\geq 2,46E+06$	

Tabela 26 - Tensões críticas e aplicação do modelo de fadiga - mistura 50/50 - 3% cimento

<b>Espessura base (cm)</b>	<b>Tensão crítica (MPa)</b>	<b>RT</b>	<b>Nf</b>
25	0,504	0,883	6,511E-01
26	0,478	0,839	4,781E+00
27	0,455	0,798	3,059E+01
28	0,433	0,760	1,724E+02
29	0,413	0,724	8,656E+02
30	0,394	0,691	3,908E+03
31	0,376	0,660	1,602E+04
32	0,359	0,630	6,005E+04
33	0,344	0,603	2,073E+05
34	0,329	0,577	6,631E+05
35	0,315	0,553	1,978E+06
36	0,302	0,530	5,536E+06
RTCD (Mpa):	0,57		
$\sigma_t$ (MPa):	0,302		
Número N:	5,536E+06	$\geq 2,46E+06$	

Tabela 27 - Tensões críticas e aplicação do modelo de fadiga - mistura 50/50 - 6% cimento

<b>Espessura (cm)</b>	<b>Tensão crítica (MPa)</b>	<b>RT</b>	<b>Nf</b>
24	0,603	0,735	5,212E+02
25	0,571	0,696	3,091E+03
26	0,541	0,659	1,605E+04
27	0,513	0,626	7,379E+04
28	0,487	0,594	3,043E+05

<b>Espessura (cm)</b>	<b>Tensão crítica (MPa)</b>	<b>RT</b>	<b>Nf</b>
29	0,463	0,565	1,136E+06
30	0,441	0,538	3,871E+06
RTCD (Mpa):	0,82		
$\sigma_t$ (MPa):	0,441		
Número N:	3,871E+06	$\geq 2,46E+06$	

Onde:

$Nf$  = Número de ciclos aplicado sobre o material, ou seja, a vida de fadiga;

$\sigma_t$  = Tensões atuantes (MPa);

RT = relação entre a tensão de tração na face inferior da camada cimentada e a resistência à tração do material cimentado.

Nas análises mecânicas realizadas, verificou-se um aumento significativo dos números N obtidos no modelo com relação ao especificado em projeto, levando-se a concluir que o pavimento poderá suportar um número de passagens admissíveis maiores que as previstas pelo tráfego atuante. No que diz respeito às tensões máximas calculadas para cada mistura estudada, as espessuras das camadas resultantes para cada mistura variaram de 30 a 40 cm. Já a relação de tensões RT ideal resultou em valores próximos, entre 0,524 e 0,538.

Na Tabela 28 e Tabela 29 estão apresentadas as espessuras das camadas do pavimento resultantes das análises mecânicas para cada mistura:

Tabela 28 - Estrutura do pavimento – método mecânico – mistura 70/30

<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>
Revestimento	6,0	Revestimento	5,0
Base Mistura 70/30 - 3%	40,0	Base Mistura 70/30 - 6%	31,0
Sub-base	16,0	Sub-base	16,0
Subleito	$\infty$	Subleito	$\infty$

Fonte: Autoria Própria (2020).

Tabela 29 - Estrutura do pavimento – método mecânico – mistura 50/50

<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>
Revestimento	5,0	Revestimento	4,0
Base 50/50 - 3%	36,0	Base 50/50 - 6%	30,0
Sub-base	16,0	Sub-base	16,0
Subleito	$\infty$	Subleito	$\infty$

Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Tabela 28 e Tabela 29 pode-se verificar as estruturas do pavimento dimensionadas através do método mecanístico, bem como as espessuras de base resultantes para cada mistura de material fresado estabilizado granulometricamente com adição de cimento.

O comparativo mais imediato entre as estruturas calculadas demonstra que a mistura 70/30 com adição de 3% de cimento resultou em maiores espessuras para as camadas de base e revestimento, quando comparadas às demais misturas, enquanto a mistura 50/50 com 6% de cimento apresentou as menores espessuras para ambas as camadas. Ainda, nas análises mecanísticas foi possível verificar resultados satisfatórios para as misturas com 6% de cimento, onde foram observadas as menores espessuras para as camadas de base para um mesmo desempenho estrutural.

Por se tratarem de estruturas com desempenhos equivalentes com relação à vida de serviço, pode-se concluir que as misturas de material fresado com adição de cimento estudadas nesta pesquisa atenderam à vida de fadiga dos modelos, no entanto, para a escolha da alternativa de mistura mais adequada é necessária a realização de análise econômica das estruturas dimensionadas.

A comparação entre as estruturas calculadas pelos dois métodos propostos no estudo permite observar que o pavimento dimensionado pelo método mecanístico resultou em espessuras consideravelmente maiores, atendendo à vida de fadiga dos modelos. O método da AASHTO gerou espessuras mais delgadas se mostrando mais arrojado na consideração destas misturas, cujo desempenho necessita de estudos mais aprofundados.

## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e considerações verificadas a partir da análise dos resultados obtidos nesta pesquisa no que diz respeito ao reaproveitamento de material fresado de pavimentos através da reciclagem na construção de novas camadas. Ao final, são elencadas algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema.

Na pesquisa, foram analisados os percentuais de material fresado dentro e acima dos limites recomendados pela normativa DNIT 167/2013-ES, sendo as misturas recicladas compostas de 50% de fresado e 50% agregados virgens e 70% fresado e 30% agregados virgens, além de se verificar o potencial de utilização do material fresado puro. Foram estudados os teores de cimento de 0%, 3% e 6%.

Com base nos ensaios de caracterização foi possível verificar que o material fresado puro não se enquadrou em nenhuma das faixas granulométricas estabelecidas pelo DNIT devido principalmente à reduzida quantidade de finos, necessitando de adição de agregados virgens para sua estabilização. O material fresado se caracteriza por granulometria predominantemente grossa que pode ser explicada em razão da aglutinação dos grãos mais finos com o ligante asfáltico levando à formação de grumos.

O ajuste granulométrico do fresado foi realizado através da adição de *filler* e pedrisco de ½”, nas proporções: 20% de *filler* e 30% de pedrisco ½” para 50% de material fresado e 20% de *filler* e 10% de pedrisco ½” para 70% de fresado, obtendo-se o enquadramento de ambas as misturas na faixa “II” do DNIT 167/2013-ES, equivalente à faixa “C” da especificação de serviço DNIT 141/2010-ES.

Com relação aos ensaios de compactação à energia modificada, foi possível observar o aumento da massa específica aparente seca máxima e a redução da umidade ótima para menores teores de fresado, que pode ser justificado pelo preenchimento dos vazios do fresado ocasionado pela adição dos agregados virgens.

No que se refere aos ensaios de Índice de Suporte Califórnia pode-se afirmar que a incorporação de *filler* e pedrisco ao material fresado promoveram o aumento do ISC levando a concluir que as misturas com maiores teores de fresado apresentaram menor capacidade de suporte.

Quanto à aplicabilidade das misturas como camadas de pavimentos, do ensaio de ISC pode-se verificar que os resultados obtidos para o fresado puro atendem aos valores mínimos aceitos para camadas de sub-base, onde de acordo com as especificações de serviço DNIT 139/2010 - ES e DNIT 141/2010 são indicados materiais com ISC acima de 20%.

A mistura 70/30 alcançou valores de ISC e expansão que atendem aos requisitos para utilização tanto em camadas de base como sub-base de pavimentos porém para baixos volumes de tráfego, como ruas laterais, acessos, acostamentos, enquanto a mistura 50/50 resultou em ISC e expansão que possibilitam o emprego em bases para altos volumes de tráfego.

Com relação aos ensaios de RCS observaram-se menores resistências à compressão para maiores teores de fresado quando comparadas às misturas com mesmos teores de cimento. Além disso, ficou evidente o ganho de resistência à medida que maiores percentuais de cimento foram aplicados às misturas.

Quanto aos parâmetros estabelecidos na especificação de serviço DNIT 167/2013-ES para RCS entre 2,1 e 2,5 MPa aos 7 dias de cura, concluiu-se que as misturas com adição de 3% de cimento apresentaram valores satisfatórios de resistência, atendendo aos critérios da norma. Por outro lado, as misturas com 6% de cimento atingiram resistências bastante elevadas, resultando em valores superiores ao intervalo definido na especificação para ambos os percentuais de fresado estudados, indo de encontro às conclusões obtidas por Fedrigo (2015).

No que diz respeito à RTCD constatou-se que menores percentuais de fresado apresentaram maiores resistências à tração, tendência também observada nos ensaios de RCS. Também ficou evidenciada a influência do teor de cimento nas resistências, sendo observado um acréscimo médio superior à 70% nas misturas com adição de 6% de cimento com relação às misturas com 3% para mesmos teores de fresado.

Os resultados obtidos para a RTCD aos 7 dias para as misturas com 3% de cimento se apresentaram dentro dos limites de 0,25 e 0,35MPa referenciados na especificação DNIT 167/2013-ES para as misturas com 50/50 e 70/30. Entretanto, as misturas com adição de 6% de cimento alcançaram valores acima do intervalo especificado para ambos percentuais de fresado, comportamento semelhante ao verificado no ensaio de RCS. A comparação dos valores de RTCD das misturas aos 7 e 28 dias de cura indicou acréscimos significativos, demonstrando ganhos de resistência para maiores períodos de cura.

Em referência aos valores recomendados por DNIT 167/2013-ES para RCS e RTCD aos 7 dias, para misturas recicladas com adição de cimento, concluiu-se que as misturas 50/50 e 70/30 com adição de 3% de cimento atenderam aos parâmetros definidos na norma podendo ser utilizadas como camadas de base de pavimentos. Já as misturas com 6% de cimento resultaram em valores acima da referência, sendo razoável a verificação do comportamento das misturas na estrutura do pavimento através de análises mecânicas.

Importante salientar que esta pesquisa demonstrou a utilização de percentuais de material fresado acima do limite de 50% recomendado pela especificação de serviço DNIT 167/2013-ES, obtendo resultados satisfatórios para as misturas com 70% de fresado, resultados também comprovados por Specht *et al.* (2013), Pires (2014) e Ely (2014)

Quanto aos ensaios de MR observou-se que misturas com maior teor de fresado apresentaram menores módulos de resiliência para o mesmo teor de cimento. Além disso, maiores adições de cimento geraram acréscimos no MR, demonstrando ganho de rigidez.

Ainda, a pesquisa abrangeu a comparação dos resultados obtidos nos ensaios com outros autores abordados na revisão bibliográfica item 2.4.2 que realizaram estudos similares de reaproveitamento de material fresado através da reciclagem com e sem a adição de cimento às misturas. A variação dos resultados entre as bibliografias pode ser observada devido aos distintos materiais de base utilizados, origem do material fresado, melhor ajuste granulométrico, energia de compactação bem como tipo de cimento utilizado. No entanto, resta evidenciado nas pesquisas que maiores percentuais de fresado apresentam menores resistências quando misturas com mesmo teor de cimento são comparadas pelos autores, ao mesmo passo que para maiores percentuais de cimento maiores RCS e RTCD são percebidas para mesmos teores de fresado. Além disso, é fato o ganho de resistência nas misturas à medida que se aumenta o tempo de cura.

O pré-dimensionamento do pavimento pelo método da AASHTO resultou em estruturas preliminares que foram utilizadas para o dimensionamento através de análises mecánísticas. Dos resultados obtidos, foi possível observar espessuras similares para as camadas de base estudadas, exceto para a mistura 70/30 com 3% cimento, que resultou em menor espessura de base, porém gerando um acréscimo na camada de revestimento quando comparado às demais misturas. Já a base da mistura 50/50 com adição de 6% de cimento gerou as menores espessuras para a camada de revestimento. As espessuras resultantes desta metodologia foram utilizadas como espessuras iniciais no software *Everstress*.

As análises mecánísticas foram realizadas com o auxílio do programa *Everstress* que forneceu as tensões entre os pneus e embaixo dos pneus, na face inferior das camadas cimentadas, levando em consideração o eixo padrão rodoviário. Na análise, foi possível verificar que as tensões embaixo dos pneus foram menores do que as geradas entre os pneus, levando a inferir que as tensões críticas ocorreram entre os pneus, ponto de aplicação onde há a sobreposição das tensões de cada pneu e a menor vida de fadiga. Além disso, observou-se que as tensões diminuem à medida que se aumenta a espessura da camada de base das misturas, aumentando a vida de fadiga do pavimento.

Aplicando-se o modelo de previsão de desempenho, a verificação à fadiga ocorreu comparando-se o número de passagens previstas e o número de passagens admissíveis para o eixo padrão. Nas análises realizadas, pôde-se perceber um aumento dos números N obtidos no modelo para as estruturas das misturas estudadas quando comparados ao número N de projeto, demonstrando que o pavimento poderá suportar maiores passagens admissíveis que as previstas. Com relação às tensões máximas calculadas para cada mistura estudada, as espessuras obtidas resultaram entre 30 a 40 cm para as camadas de base, enquanto a relação de tensões RT ideal variou de 0,524 a 0,532.

Analisando as estruturas obtidas das análises mecânicas, percebe-se que a mistura 70/30 com adição de 3% de cimento foi a que obteve as maiores espessuras tanto para as camadas de base como revestimento. Além disso, as análises realizadas demonstraram menores espessuras de base para misturas com maior adição de cimento, sendo a mistura 50/50 com 6% de cimento a que apresentou as menores camadas, tanto de base como de revestimento. Devido às estruturas dimensionadas apresentarem desempenhos equivalentes com relação à vida de serviço, verificou-se que todas as misturas de material fresado com adição de cimento estudadas nesta pesquisa atenderam à vida de fadiga do modelo. No entanto, para a escolha da alternativa de mistura mais viável é necessária a realização de análise econômica das estruturas dimensionadas.

Do ponto de vista ambiental, pode-se afirmar que as misturas ideais são as que apresentam maior percentual de fresado, tendo em vista um maior reaproveitamento do material, reduzindo os impactos ambientais e atenuando os problemas relacionados ao descarte inadequado dos resíduos.

Por fim, de acordo com os resultados laboratoriais obtidos bem como projeto de dimensionamento das estruturas compostas de bases das misturas recicladas com adição de cimento, resta evidenciado o reaproveitamento do material fresado através da reciclagem em camadas de pavimentos, sendo indispensável a análise econômica para a definição da alternativa mais viável. Com esta pesquisa, espera-se contribuir para a discussão e incentivo do reaproveitamento dos resíduos da manutenção de pavimentos degradados para fins de se proporcionar um destino correto para os resíduos gerados, contribuindo assim para redução dos impactos ambientais e uma engenharia sustentável.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros:**

Para dar continuidade a esta pesquisa, sugere-se os seguintes estudos:



- Análise econômica das estruturas dimensionadas;
- Realização de ensaios de fadiga à compressão diametral;
- Utilização de outras energias de compactação e comparativo entre os resultados;
- Avaliação de outros percentuais de material fresado visando a máxima utilização do material;
- Análise da utilização de outros tipos de cimento na composição das misturas;
- Aplicação dos resultados obtidos no estudo em pistas experimentais e realizar o acompanhamento do desempenho dos pavimentos.

## 6. REFERÊNCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **Guide for the design of pavement structure**. Washington, D.C., 1993.

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **Guide for the design of pavement structure. 1985**. Washington, D.C., 2001

ALVES, L. F. **Análise paramétrica do comportamento mecânico de camadas granulares de pavimentos flexíveis via método computacional**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2014.

ALMEIDA, R. M. S. **Estabilização de areias monogranulares para fins rodoviários – estudo aplicado à região de Mira**. Dissertação de mestrado. Universidade de Aveiro. Aveiro, 2009.

ARANHA, A. L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em engenharia) – USP. São Paulo, 2013.

ARRA - ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. Dezembro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182: Ensaio de Compactação do Solo**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004: Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11.578: Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE. **Recyclage des Chaussées (Guides): AIPCR. 78.02.BFR**. Paris, 2003.

BALBO, J. T. **Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semi-Rígidos**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1993.

BALBO, J. T., **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projeto e restauração**. São Paulo, 2007.  
BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Petrobrás: ABEDA. Rio de Janeiro, 2008.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª edição rev e atual. São Paulo: Exceção Editorial, 2007.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. Cerâmica: São Paulo, v. 61, n. 358, 2015.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França**. 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Anais. Foz do Iguaçu, 2011.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte 2019**. Disponível em: < <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019>>. Acesso online em: 14 de abril de 2020.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução N° 307/2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Brasil, 2002.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 448/2012. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**. Brasil, 2012.

COOLEY, D. A. **Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties of Base Materials**. Dissertação de mestrado – Department of Civil and Environmental Engineering – Brigham Young University. Provo/EUA, 2005.

CORDEIRO, J. K. DA S. **Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E&P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.

COSTA, C.; PINTO, S. **O uso de reciclagem de pavimentos como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil**. São Paulo: Revista Engenharia, 602 ed, 2011.

CUNHA, C. M. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Diferentes Tipos de Reciclagem**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa: Departamento de Engenharia Civil, 2010.

DAER – DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Anteprojeto Geométrico**. RST – Erechim – Goio En, 1979.

DAER – DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Diretrizes para Gestão de Material Fresado.** SMA-PR-007. RS, 2019.

DAVID, D. de. **Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2006.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 024/94: Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelmann,** 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 083/98: Agregados – análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 091/98: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1998.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Glossário de Termos Técnicos Rodoviários.** Rio de Janeiro, 1997.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** Ministério dos Transportes, Publicação IPR-66-22. Rio de Janeiro, 1981.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010-ES: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2010-ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 164/2013-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2013a.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 167/2013-ES: Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro, 2013b.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 160/2016-ME. Solos – Determinação da expansibilidade – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2016a.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 172/2016-ME: Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2016b.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135/2010-ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do**

**módulo de resiliência – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2018-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Estudos de Tráfego.** Publicação IPR-723, Rio de Janeiro, 2006a.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006b.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006c.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Quadro de Fabricantes de Veículos,** Brasília, 2007.

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

EVERSERIES. **User’s Guide – Pavement Analysis Computer Software and Case Studies.** Washington State Department of Transportation, 2005.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland: definição das bases para um método de dosagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2015.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

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

HERMES, T. B.; ECHEVERRRIA, J. A .S; SPECHT, L. P. **Utilização de material fresado como camada de pavimento em construção de faixa adicional.** ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação. Revista Pavimentação. v. 41. 2016.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice.** Sydney, 1972.

JOHNSTON, M. G. **Desempenho de Pavimentos com Materiais Alternativos do Estado do Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado) – UFRGS. Porto Alegre, 2010.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos.** Tese (Doutorado) – UFRGS. Porto Alegre, 2009.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação. Notas de Aula da disciplina de Pavimentação.** Departamento de Transportes e Geotecnia. Faculdade de Engenharia Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2009.

MEDINA, J. DE; MOTTA, L. M. G. DA. **Mecânica dos Pavimentos.** 3ª Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MINGUELA, J. D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ com cemento.** Tese de Doutorado em engenharia – Universidad de Burgos, Espanha, 2011.

MOLZ, C. **Viabilidade da utilização do material fresado estabilizado granulometricamente em base de pavimentos.** Trabalho de conclusão de curso (Engenharia civil) – UFSM. Santa Maria, 2017.

MOTTA, L. M. G. da. **Método de dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, critérios de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

NAPA - NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2017.** 8 th Annual Asphalt Pavement Industry Survey. IS 138. 2018.

NETO, R. S. B. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empíricos do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a Região de Campo Grande (MS).** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 2004.

OLIVEIRA, E. G. **Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Demolição: Estudo de Caso da Resolução 307 do CONAMA.** Monografia Graduação em Engenharia Ambiental UFG. Goiás, 2008.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. **Análise das propriedades da base de solo-cimento deteriorada para fins de reciclagem profunda de pavimentos.** In: 7º Congresso Rodoviário Português – Anais. Lisboa, 2013.

PAIVA, C. E. L.; OLIVEIRA, P. C. A. **Reciclagem de pavimentos: Estudo da influência do tipo de cimento Portland na resistência à compressão simples do material reciclado.** In: IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço – Anais. Fortaleza, 2009.

PEREIRA, R. **Técnicas e tendências dos processos de restauração de rodovias.** Cachoeirinha/RS, 2017.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** 2ª Edição. Rio de Janeiro: S. Pinto, 2002.

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) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Norma IP-08/2004: Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento.** São Paulo, 2004.

RIBEIRO, F. **Estudo da aplicação do agregado reciclado na base de um pavimento flexível.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. Goiânia, 2006.

RODRIGUES, J. P. L. **Análise e Aplicação do Método de Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação) – Universidade de Coimbra – FCTUC. Portugal, 2013.

SACHET, T. *et al.* **Interpretação da perda de resistência em concretos secos com incorporação de fresados asfálticos com apoio de análise microscópica.** Revista IBRACON Riem, Dez. 2013

SENÇO, W. **Manual de técnicas de projetos rodoviários.** SÃO PAULO: PINI, 2008.

SILVA, C. F. S. C. **Reutilização do resíduo oriundo dos serviços de restauração asfáltica como material alternativo em camadas de pavimentos flexíveis.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2012

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.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2016.

SPECHT, L. P.; PIRES, G.; VITORELO, T; HIRSCH, F; CRONST, F; BERGMANN, E; TIEFENSE. **Utilização de material fresado como camada de pavimento: Estudo laboratorial e aplicação em campo.** 2ª RAPv - Reunião Anual de Pavimentação. Gramado, 2013.

TAHA, R.; AL-HARTHY, A.; AL-SHAMSI, K.; AL-ZUBEIDI, M. **Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases.** Journal of Materials in Civil Engineering. v. 14, n 3, 2002.

TRICHÊS, G. **Concreto Compactado a Rolo para Aplicação em Pavimentação: Estudo do Comportamento na Fadiga e Proposição de Metodologia de Dimensionamento.** Tese. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA. São José dos Campos, 1993.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. **Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC-303.** 7º Congresso Brasileiro de Rodovias & Concessões – Anais. Foz do Iguaçu, 2011.

YODER, E. J; Witczak, M. W. **Principles of pavement design.** 2ª ed. Nova Iorque: John Wiley & Sonos, INC. 1975.

YUAN, D., NAZARIAN, S., HOYOS, L. R., & PUPPALA, A. J. **Evaluation and Mix Design of Cement-Treated Base Materials with High Content of Reclaimed Asphalt Pavement.** Transportation Research Record. Washigton, 2012.

WIRTGEN GMB. **Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen.**  
Windhagen, Alemanha, 2012.



## APÊNDICE 1: Ensaios de Granulometria

Figura 59 – Ensaio de granulometria por peneiramento – material fresado

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98										
OBRA			MATERIAL				APLICAÇÃO			
<b>RSC-480</b>			<b>FRESADO</b>							
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR						OPERADOR		DATA		
km 5,2 - km 5,4								17.05.2019		
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)			Peso da Amostra (g)			MÉDIA	FAIXA ESPECIFICADA	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul.(g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul.(g)	% Retida Acumulada	Que Passa	% Que Passa	MÍNIMO	MÁXIMO
2"	50,8	0,0	0,0	100,00				100,00		
1"	25,40	0,0	0,0	100,00				100,00		
3/8"	9,50	787,8	25,7	74,34				74,34		
Nº 4	4,80	1.735,6	56,5	43,46				43,46		
Nº 10	2,00	2.449,8	79,8	20,19				20,19		
Nº 40	0,42	2.873,6	93,6	6,39				6,39		
Nº 200	0,075	3.013,2	98,2	1,84				1,84		

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

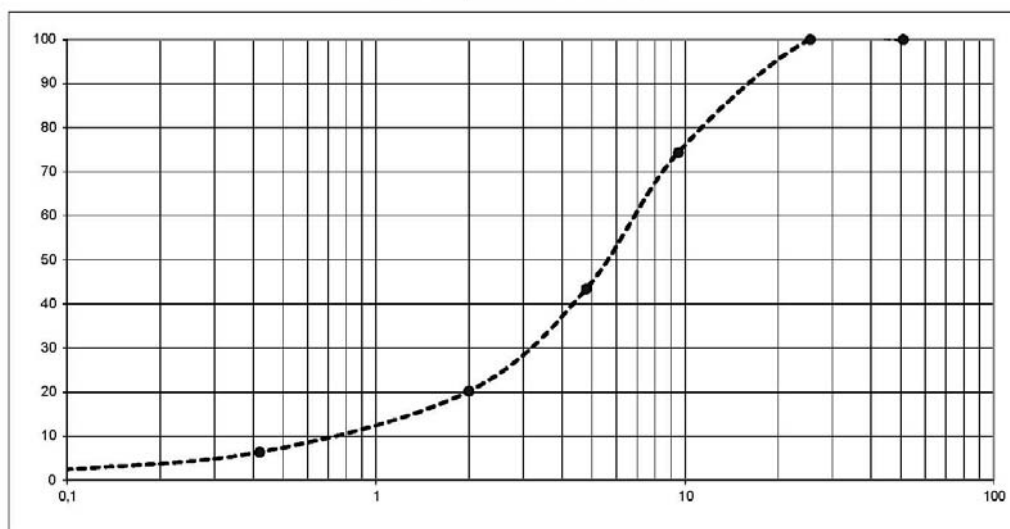


Figura 60 – Ensaio de granulometria por peneiramento – pó fino

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98											
OBRA				MATERIAL				APLICAÇÃO			
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR				PÓ FINO				OPERADOR		DATA	
PEDREIRA VILA RICA										11.04.2019	
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)			Peso da Amostra (g)			MÉDIA		FAIXA ESPECIFICADA	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul.(g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul.(g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	% Que Passa	MÍNIMO	MÁXIMO	
2"	50,8	0,0	0,0	100,0				100,0			
1"	25,40	0,0	0,0	100,0				100,0			
3/8"	9,50	0,0	0,0	100,0				100,0			
Nº 4	4,80	11,8	0,9	99,1				99,1			
Nº 10	2,00	445,5	33,2	66,8				66,8			
Nº 40	0,42	991,3	73,8	26,2				26,2			
Nº 200	0,075	1.141,4	85,0	15,0				15,0			

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

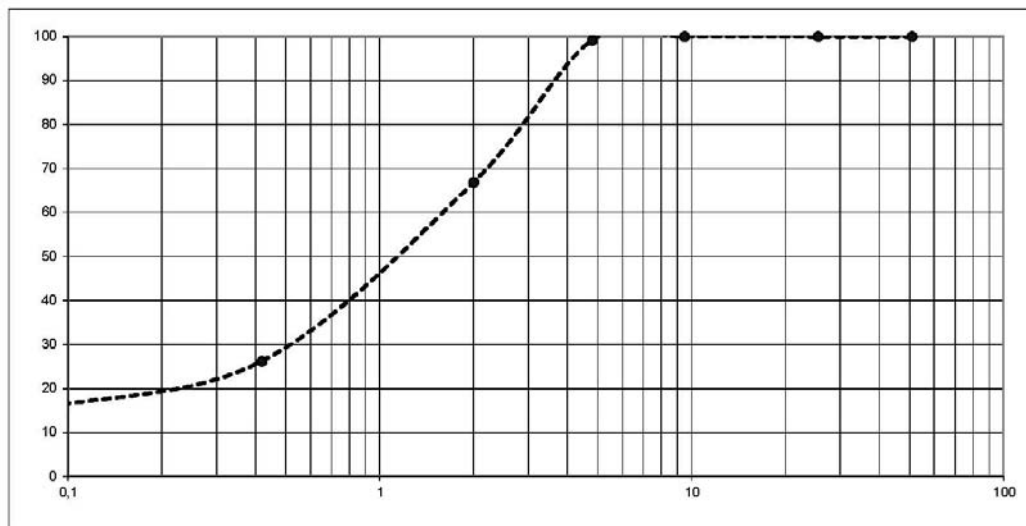


Figura 61 – Ensaio de granulometria por peneiramento – areia fina

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98										
OBRA				MATERIAL				APLICAÇÃO		
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR				OPERADOR				DATA		
PEDREIRA VILA RICA				AREIA FINA				11.04.2019		
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)			Peso da Amostra (g)			MÉDIA	FAIXA ESPECIFICADA	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	% Que Passa	MÍNIMO	MÁXIMO
2"	50,8	0,0	0,0	100,0				100,0		
1"	25,40	0,0	0,0	100,0				100,0		
3/8"	9,50	0,0	0,0	100,0				100,0		
Nº 4	4,80	0,0	0,0	100,0				100,0		
Nº 10	2,00	0,0	0,0	100,0				100,0		
Nº 40	0,42	19,7	2,4	97,6				97,6		
Nº 200	0,075	812,3	98,9	1,1				1,1		

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

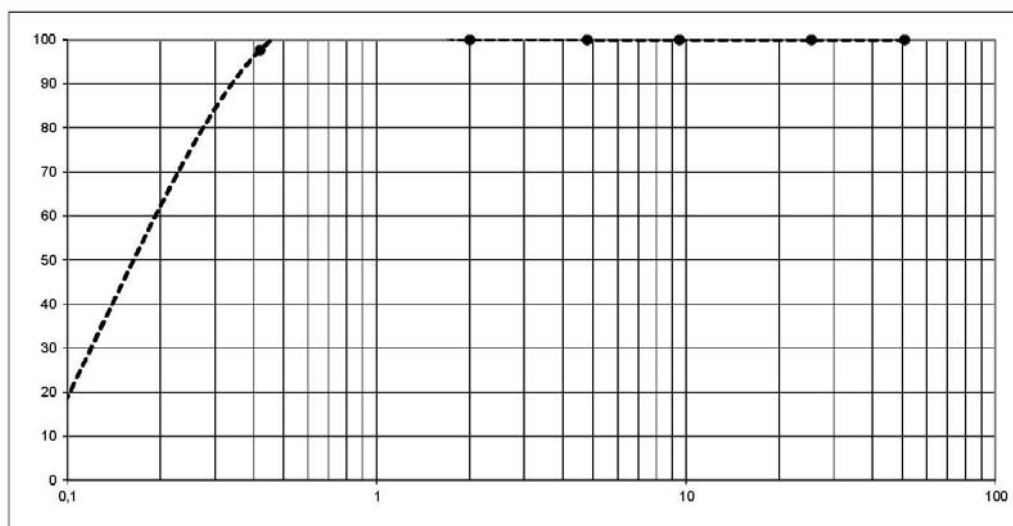


Figura 62 – Ensaio de granulometria por peneiramento – areia industrial

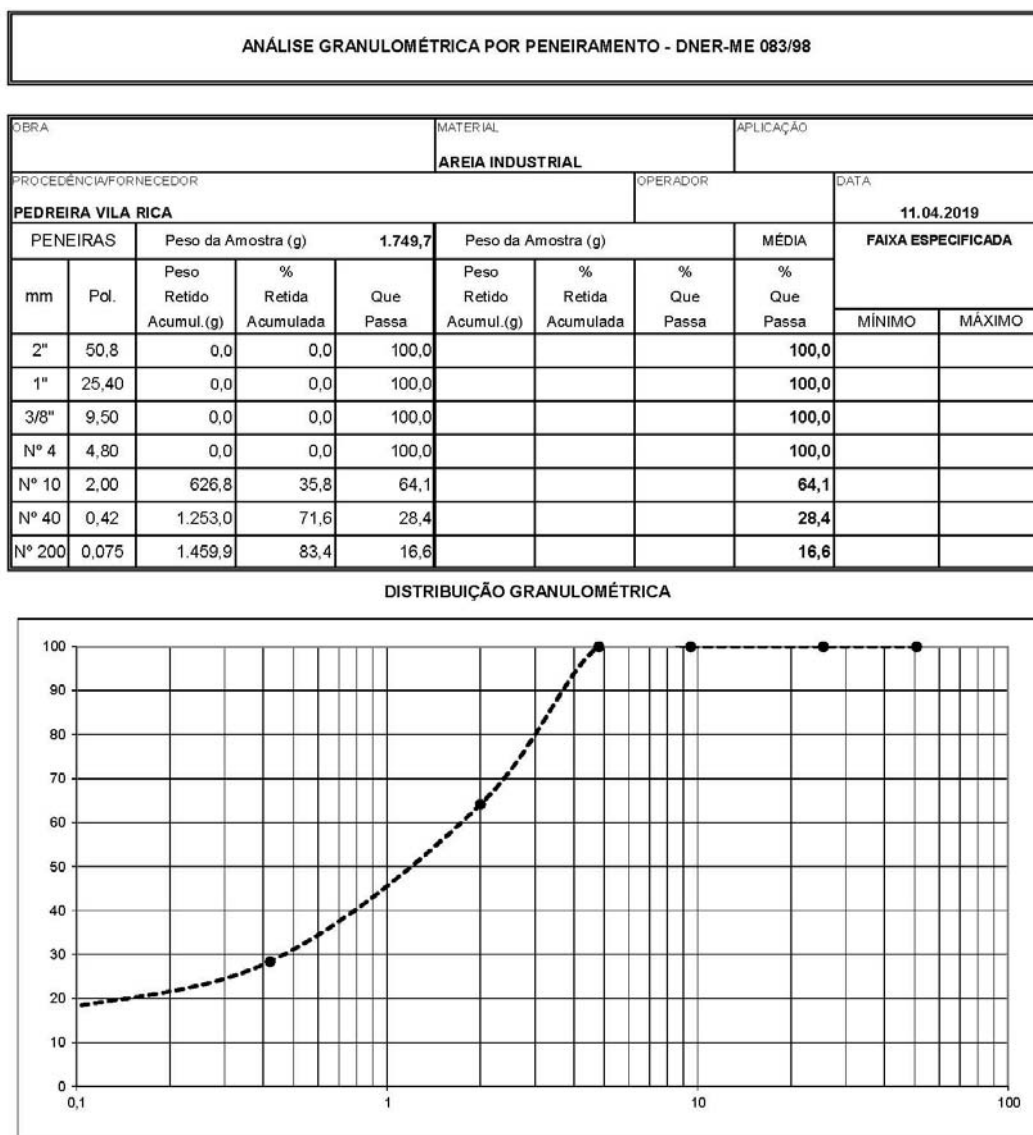


Figura 63 – Ensaio de granulometria por peneiramento – brita 0,1

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98										
OBRA			MATERIAL				APLICAÇÃO			
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR			BRITA - 0,1				OPERADOR		DATA	
PEDREIRA VILA RICA									11.04.2019	
PENEIRAS		Peso da Amostra (g) 4.577,6			Peso da Amostra (g)			MÉDIA	FAIXA ESPECIFICADA	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	% Que Passa	MÍNIMO	MÁXIMO
2"	50,8	0,0	0,0	100,0				100,0		
1"	25,40	0,0	0,0	100,0				100,0		
3/8"	9,50	3.606,7	78,8	21,2				21,2		
Nº 4	4,75	4.528,4	98,9	1,1				1,1		
Nº 10	2,00	4.552,0	99,4	0,6				0,6		
Nº 40	0,425	4.557,8	99,6	0,4				0,4		
Nº 200	0,075	4.562,8	99,7	0,3				0,3		

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

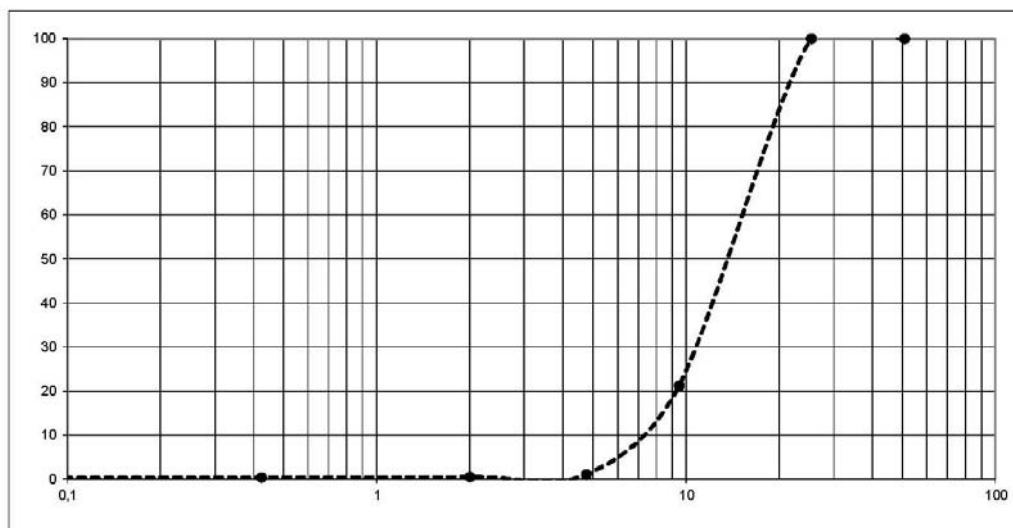


Figura 64 – Ensaio de granulometria por peneiramento – filler

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98											
OBRA				MATERIAL				APLICAÇÃO			
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR				FILLER				OPERADOR		DATA	
PEDREIRA VILA RICA										11.04.2019	
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)			Peso da Amostra (g)			MÉDIA		FAIXA ESPECIFICADA	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	% Que Passa	MÍNIMO	MÁXIMO	
2"	50,8	0,0	0,0	100,0				100,0			
1"	25,40	0,0	0,0	100,0				100,0			
3/8"	9,50	0,0	0,0	100,0				100,0			
Nº 4	4,80	0,0	0,0	100,0				100,0			
Nº 10	2,00	4,6	0,6	99,4				99,4			
Nº 40	0,42	146,7	20,4	79,6				79,6			
Nº 200	0,075	404,2	56,1	43,9				43,9			

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

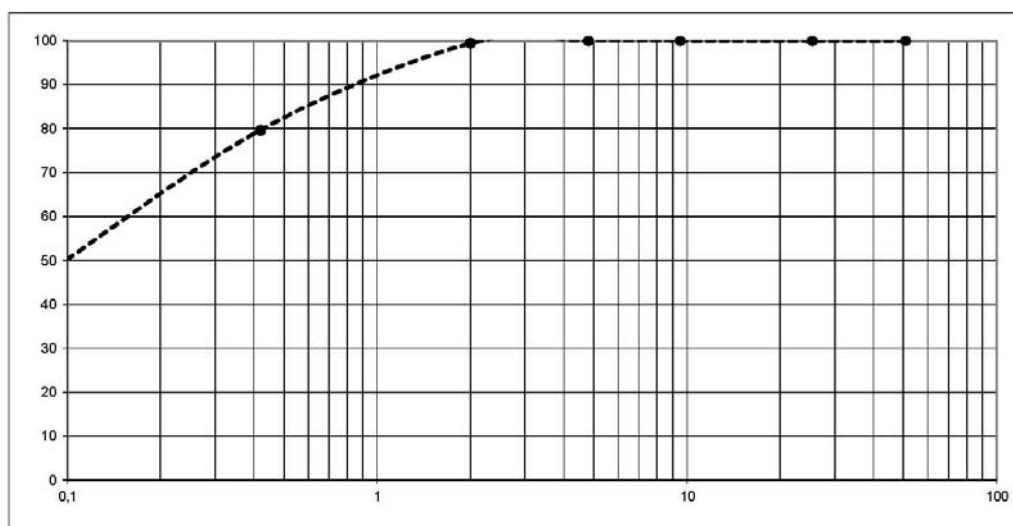


Figura 65 – Ensaio de granulometria por peneiramento – pedrisco 1/2”

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98											
OBRA			MATERIAL				APLICAÇÃO				
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR			PEDRISCO 1/2"				OPERADOR			DATA	
PEDREIRA VILA RICA			5.600,3							11.04.2019	
PENEIRAS	Pol.	Peso da Amostra (g)			Peso da Amostra (g)			MÉDIA		FAIXA ESPECIFICADA	
		Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	% Que Passa	MÍNIMO	MÁXIMO	
2"	50,8	0,0	0,0	100,0				100,0			
1"	25,40	0,0	0,0	100,0				100,0			
3/8"	9,50	1.048,4	18,7	81,3				81,3			
Nº 4	4,80	5.406,1	96,5	3,5				3,5			
Nº 10	2,00	5.503,7	98,3	1,7				1,7			
Nº 40	0,42	5.509,5	98,4	1,6				1,6			
Nº 200	0,075	5.523,1	98,6	1,4				1,4			

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

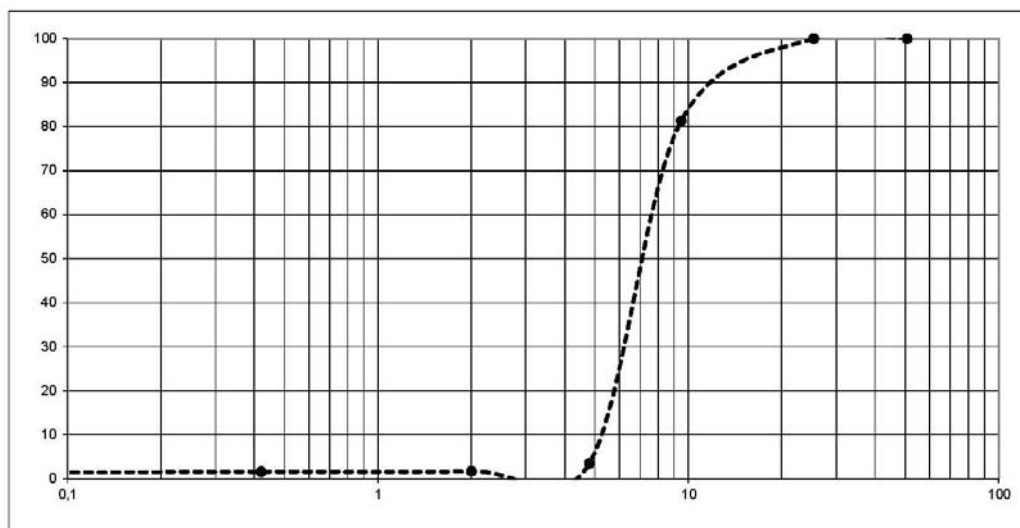


Figura 66 – Ensaio de granulometria por peneiramento – pedrisco 3/8”

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98											
OBRA				MATERIAL				APLICAÇÃO			
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR				OPERADOR				DATA			
PEDREIRA VILA RICA				PEDRISCO 3/8				11.04.2019			
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)			Peso da Amostra (g)			MÉDIA		FAIXA ESPECIFICADA	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	% Que Passa	MÍNIMO	MÁXIMO	
2"	50,8	0,0	0,0	100,0				100,0			
1"	25,40	0,0	0,0	100,0				100,0			
3/8"	9,50	1.360,2	23,6	76,4				76,4			
Nº 4	4,80	5.242,2	90,9	9,1				9,1			
Nº 10	2,00	5.732,0	99,4	0,6				0,6			
Nº 40	0,42	5.740,6	99,5	0,5				0,5			
Nº 200	0,075	5.743,2	99,5	0,5				0,5			

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

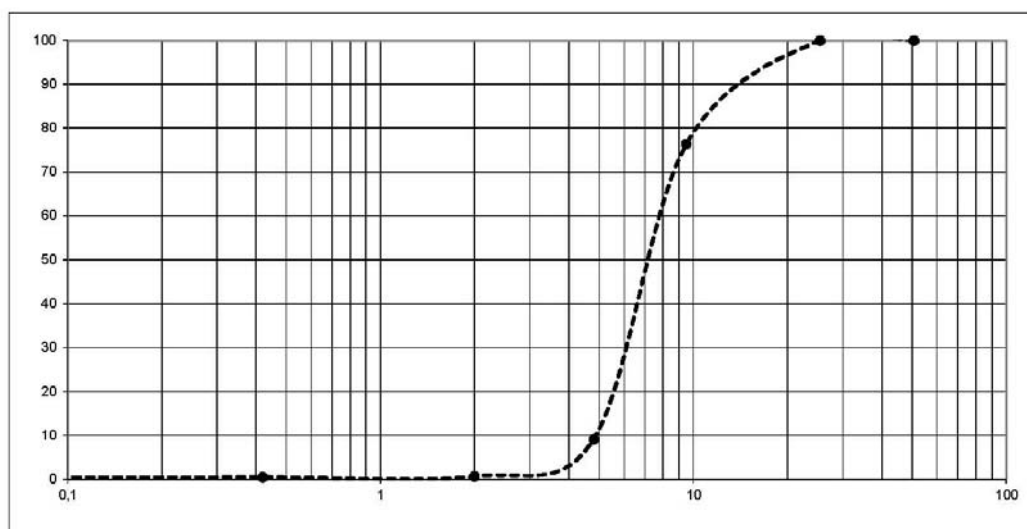




Figura 67 – Ensaio de granulometria por peneiramento – pedrisco 3/8” lascado

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98											
OBRA				MATERIAL				APLICAÇÃO			
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR				OPERADOR				DATA			
PEDREIRA VILA RICA								11.04.2019			
PENEIRAS		Peso da Amostra (g)			Peso da Amostra (g)			MÉDIA	FAIXA ESPECIFICADA		
mm	Pol.	Peso Retido Acumul.(g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul.(g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	% Que Passa	MÍNIMO	MÁXIMO	
2"	50,8	0,0	0,0	100,0				100,0			
1"	25,40	0,0	0,0	100,0				100,0			
3/8"	9,50	129,0	2,7	97,3				97,3			
Nº 4	4,80	3.606,8	76,0	24,0				24,0			
Nº 10	2,00	4.655,6	98,1	1,9				1,9			
Nº 40	0,42	4.665,5	98,3	1,7				1,7			
Nº 200	0,075	4.672,1	98,4	1,6				1,6			

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

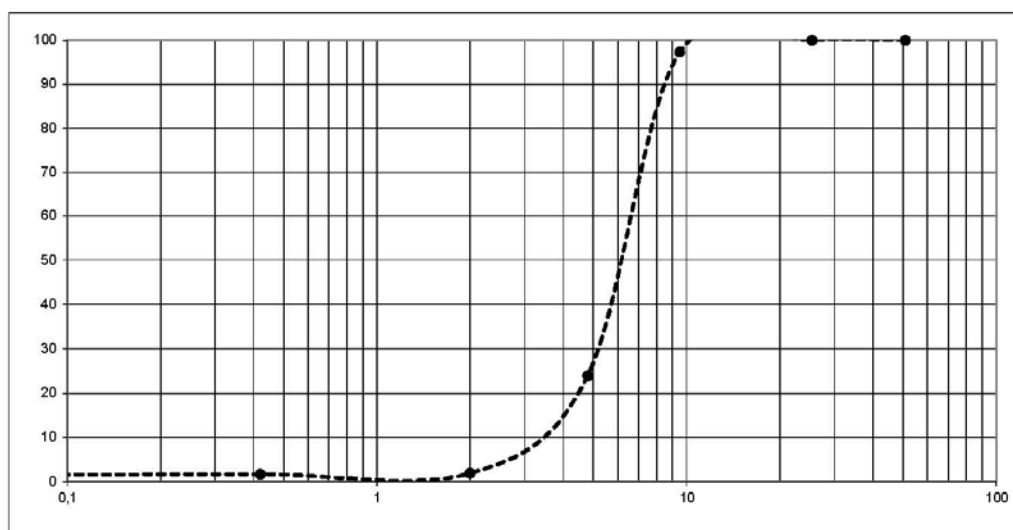
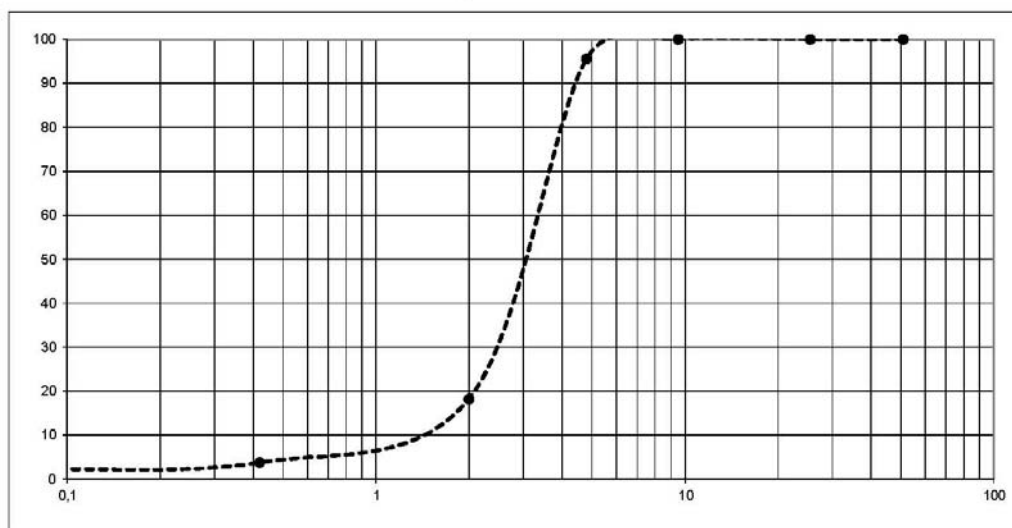


Figura 68 – Ensaio de granulometria por peneiramento – Granilha

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO - DNER-ME 083/98											
OBRA				MATERIAL				APLICAÇÃO			
PROCEDÊNCIA/FORNECEDOR				OPERADOR				DATA			
PEDREIRA VILA RICA								11.04.2019			
PENEIRAS		Peso da Amostra (g) 4.942,3			Peso da Amostra (g)			MÉDIA		FAIXA ESPECIFICADA	
mm	Pol.	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	Que Passa	Peso Retido Acumul. (g)	% Retida Acumulada	% Que Passa	% Que Passa		MÍNIMO	MÁXIMO
2"	50,8	0,0	0,0	100,0				100,0			
1"	25,40	0,0	0,0	100,0				100,0			
3/8"	9,50	0,0	0,0	100,0				100,0			
Nº 4	4,80	220,0	4,5	95,5				95,5			
Nº 10	2,00	4.039,9	81,7	18,3				18,3			
Nº 40	0,42	4.754,9	96,2	3,8				3,8			
Nº 200	0,075	4.836,3	97,9	2,1				2,1			

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA



## APÊNDICE 2: Moldagem dos corpos de prova

Quadro 3 - Características da moldagem dos corpos de prova por tipo de ensaio

Ensaio	Molde	Material	Tempo de cura (dias)	Quantidade CPs	Total CPs / Ensaio
Índice de suporte califórnia (ISC)	Cilíndrico (10 x 20 cm)	fresado puro	7	3	9
		mistura 70/30	7	3	
		mistura 50/50	7	3	
Resistência à compressão simples (RCS)	Cilíndrico (10 x 20 cm)	mistura 70/30 3%cimento	7	3	12
		mistura 70/30 6%cimento	7	3	
		mistura 50/50 3%cimento	7	3	
		mistura 50/50 6% cimento	7	3	
Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	mistura 70/30 3%cimento	7, 28	7	28
		mistura 70/30 6%cimento	7, 28	7	
		mistura 50/50 3%cimento	7, 28	7	
		mistura 50/50 6% cimento	7, 28	7	
Módulo de resiliência na compressão diametral (MR)	Cilíndrico / Marshall (10,2 x 6,5 cm)	mistura 70/30 3%cimento	28	3 (*)	12 (*)
		mistura 70/30 6%cimento	28	3 (*)	
		mistura 50/50 3%cimento	28	3 (*)	
		mistura 50/50 6% cimento	28	3 (*)	

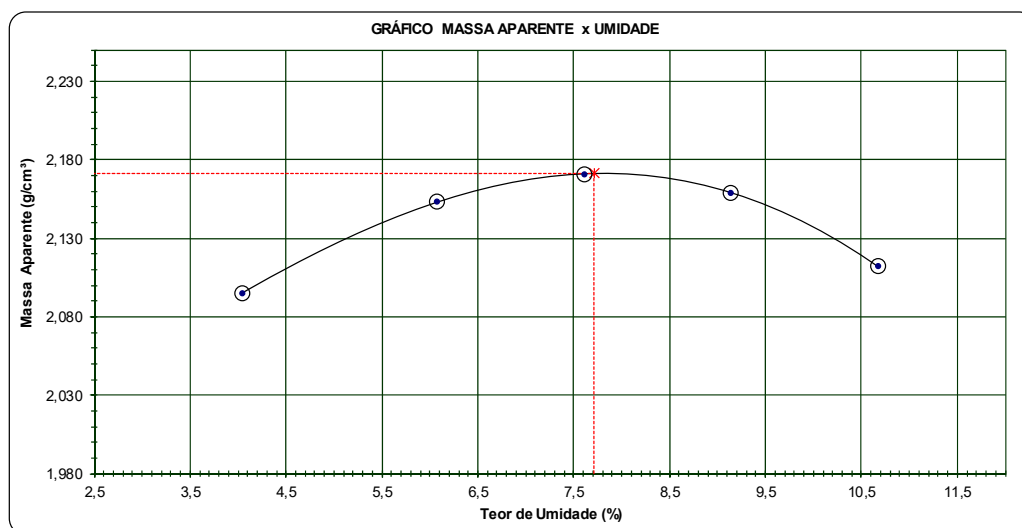
(\*) Obs: O ensaio de MR utilizou os mesmos corpos de prova dos ensaios de RTDC aos 28 dias. Para a realização do ensaio de MR, um dos corpos de prova moldados foi rompido por tração.

Fonte: Autoria Própria (2020).

### APÊNDICE 3: Ensaios de Compactação

Figura 69 – Ensaio de compactação – Material fresado

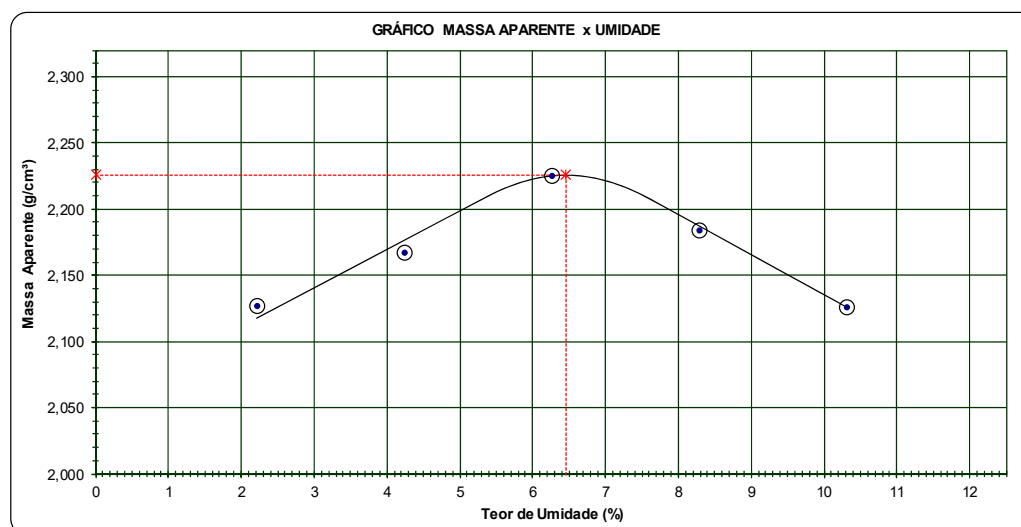
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR)					
OBRA	RSC-480		TRECHO	km 5,2 - km 5,4	
				DATA	24.05.2019
MATERIAL	FRESADO PURO		AMOSTRA	01	
				ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	PROCTOR MODIFICADO
COMPACTAÇÃO DE SOLOS - DNER-ME - 162/94 / DNIT 164/2013-ME					
Cilindro nº	02	02	02	02	02
Água Adicionada(%)	2,0	4,0	5,5	7,0	8,5
Água Adicionada(ml)	140	280	385	490	595
Cilindro+Solo Úmido(g)	7.923	8.144	8.257	8.298	8.258
Peso do Cilindro(g)	3.296	3.296	3.296	3.296	3.296
Peso do Solo Úmido(g)	4.627	4.848	4.961	5.002	4.962
Volume do Cilindro(cm <sup>3</sup> )	2.123	2.123	2.123	2.123	2.123
Dens. Apar. Úmida(g/cm <sup>3</sup> )	2,180	2,284	2,337	2,356	2,337
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE					
UMIDADE HIGROSCÓPICA			Teor de Umidade Médio (%)		2,0
Cápsula nº			Peso da Amostra Úmida (g)		7.000
Cápsula+Solo Úmido(g)	155,60	145,60	Peso da Amostra Seca (g)		6.863
Cápsula+Solo Seco(g)	152,50	142,80	Água Contida na Amostra (ml)		137
Peso da Água(g)	3,10	2,80			
Peso da Cápsula(g)					
Peso do Solo Seco(g)	152,50	142,80			
Teor de Umidade(%)	2,0	2,0			
Umidade Adotada(%)	4,0	6,1	7,6	9,1	10,7
Massa. Apar. Seca(g/cm <sup>3</sup> )	2,095	2,153	2,171	2,159	2,112



MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA SECA	<b>2,171 g/cm<sup>3</sup></b>	UMIDADE ÓTIMA	<b>7,71</b>
------------------------------	-------------------------------	---------------	-------------

Figura 70 – Ensaio de compactação – Mistura 70/30

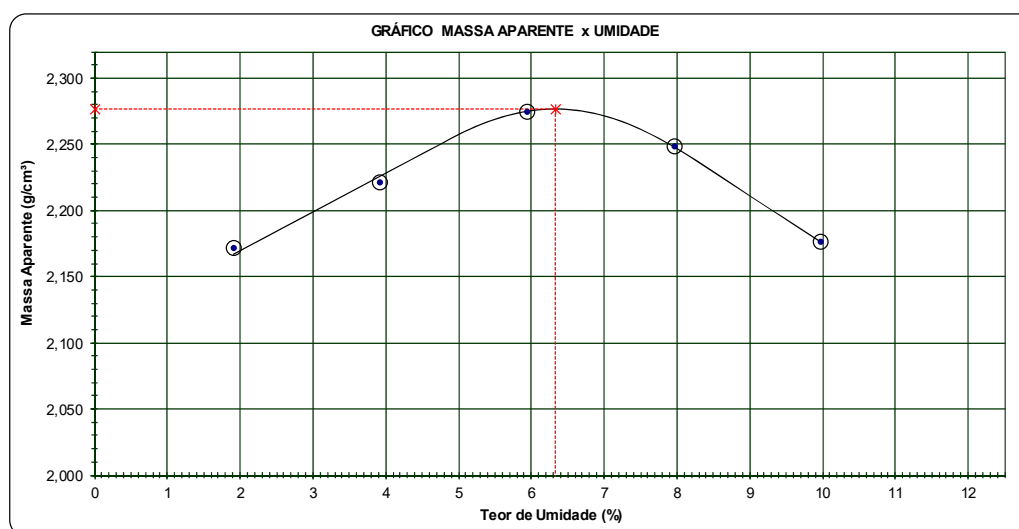
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR)					
OBRA RSC-480		TRECHO km 5,2 - km 5,4			DATA 31.05.2019
MATERIAL 70% FRESADO, 20% FILLER, 10% PEDRISCO 1/2"		AMOSTRA 01		ENERGIA DE COMPACTAÇÃO PROCTOR MODIFICADO	
COMPACTAÇÃO DE SOLOS - DNER-ME - 162/94 / DNIT 164/2013-ME					
Cilindro nº	02	02	02	02	02
Água Adicionada(%)	1,0	3,0	5,0	7,0	9,0
Água Adicionada(ml)	63	189	315	442	568
Cilindro+Solo Úmido(g)	7.913	8.093	8.315	8.317	8.275
Peso do Cilindro(g)	3.296	3.296	3.296	3.296	3.296
Peso do Solo Úmido(g)	4.617	4.797	5.019	5.021	4.979
Volume do Cilindro(cm <sup>3</sup> )	2.123	2.123	2.123	2.123	2.123
Massa Apar. Úmida(g/cm <sup>3</sup> )	2,175	2,259	2,364	2,365	2,345
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE					
UMIDADE HIGROSCÓPICA			Teor de Umidade Médio (%)		1,2
Cápsula nº			Peso da Amostra Úmida (g)		6.308
Cápsula+Solo Úmido(g)	192,50	188,70	Peso da Amostra Seca (g)		6.233
Cápsula+Solo Seco(g)	190,30	186,50	Água Contida na Amostra ml)		75
Peso da Água(g)	2,20	2,20	Umidade Adotada(%)		10,3
Peso da Cápsula(g)			Massa Apar. Seca(g/cm <sup>3</sup> )		2,126
Peso do Solo Seco(g)	190,30	186,50	6,3	8,3	
Teor de Umidade(%)	1,2	1,2			
Umidade Adotada(%)	2,2	4,2			
Massa Apar. Seca(g/cm <sup>3</sup> )	2,127	2,167			



MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA SECA	<b>2,226 g/cm<sup>3</sup></b>	UMIDADE ÓTIMA	<b>6,46</b>
------------------------------	-------------------------------	---------------	-------------

Figura 71 – Ensaio de compactação – Mistura 50/50

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR)							
OBRA	RSC-480			TRECHO	km 5,2 - km 5,4	DATA	03.06.2019
MATERIAL	50% FRESADO, 20% FILLER, 30% PEDRISCO 1/2"			AMOSTRA	01	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	PROCTOR MODIFICADO
COMPACTAÇÃO DE SOLOS - DNER-ME - 162/94 / DNIT 164/2013-ME							
Cilindro nº	02	02	02	02	02		
Água Adicionada(%)	1,0	3,0	5,0	7,0	9,0		
Água Adicionada(ml)	63	189	314	440	566		
Cilindro+Solo Úmido(g)	7.994	8.196	8.413	8.448	8.376		
Peso do Cilindro(g)	3.296	3.296	3.296	3.296	3.296		
Peso do Solo Úmido(g)	4.698	4.900	5.117	5.152	5.080		
Volume do Cilindro(cm <sup>3</sup> )	2.123	2.123	2.123	2.123	2.123		
Massa Apar. Úmida(g/cm <sup>3</sup> )	2,213	2,308	2,410	2,427	2,393		
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE							
UMIDADE HIGROSCÓPICA				Teor de Umidade Médio (%)		0,9	
Cápsula nº				Peso da Amostra Úmida (g)		6.288	
Cápsula+Solo Úmido(g)	212,70	208,40		Peso da Amostra Seca (g)		6.232	
Cápsula+Solo Seco(g)	210,90	206,60		Água Contida na Amostra ml)		56	
Peso da Água(g)	1,80	1,80		Umidade Adotada(%)		10,0	
Peso da Cápsula(g)				Massa Apar. Seca(g/cm <sup>3</sup> )		2,176	
Peso do Solo Seco(g)	210,90	206,60					
Teor de Umidade(%)	0,9	0,9					
Umidade Adotada(%)	1,9	3,9					
Massa Apar. Seca(g/cm <sup>3</sup> )	2,172	2,221					
				5,9	8,0		



MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA SECA	<b>2,277 g/cm<sup>3</sup></b>	UMIDADE ÓTIMA	<b>6,33</b>
------------------------------	-------------------------------	---------------	-------------

## APÊNDICE 4: Ensaio de Índice Suporte Califórnia – ISC

Figura 72 – Ensaio de ISC – Material Fresado Amostra 01

<b>ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)</b>						
RODOVIA		TRECHO			DATA	
RSC-480		km 5,2 - km 5,4			27.05.2019	
MATERIAL		AMOSTRA		ENERGIA		
FRESADO PURO		01		PROCTOR MODIFICADO		
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA						
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO
Cápsula nº				222      128		
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)		278,70		117,77      128,55		
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)		275,70		110,31      121,08		
Peso da Água(g)		3,00		7,46      7,47		
Peso da Cápsula(g)				13,09      23,03		
Peso do Solo Seco(g)		275,70		97,22      98,05		
Teor de Umidade(%)		1,1		7,7      7,6		
Umidade Média(%)		1,1		7,7		
UMID. ÓTIMA(%):		7,71		AMOSTRA ÚMIDA(g):		7.020
				ÁGUA A ADICIONAR(ml):		459
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME				EXPANSÃO		
DENSIDADE		MOLDAGEM	SATURADO	Altura do Corpo de Prova (mm)		113,7
Cilindro nº		3				
Água Adicionada(ml)		459		DATA		
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)		9.900		Tempo Decorrido em dias		Expansão Lida em mm
Peso do Cilindro(g)		5.166		0		0,00
Peso do Solo Úmido(g)		4.734		27.05.2019		0,00
Volume do Cilindro(cm <sup>3</sup> )		2.063		28.05.2019		0,00
Massa Aparente Úmida(g/cm <sup>3</sup> )		2.295		29.05.2019		0,00
Massa Aparente Seca(g/cm <sup>3</sup> )		2.132		30.05.2019		0,00
		2.132		31.05.2019		0,00
ENSAIO DE PENETRAÇÃO				GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO		
Constante do Anel (3542)				0,09951		
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )			
0,5	0,64	14	1,4			
1,0	1,27	41	4,1			
1,5	1,91	77	7,7			
2,0	2,54	118	11,7			
3,0	3,81	203	20,2			
4,0	5,08	287	28,6			
6,0	7,62	354	35,2			
8,0	10,16					
10,0	12,70					
CÁLCULO DO I.S.C.						
Leitura (mm)	pressão		I.S.C. (%)			
	aplic.	Corrigida				
2,54	11,7	16,9	24,1			
5,08	28,6	30,6	29,0			
MASSA ESP. SECA MÁX. (g/cm <sup>3</sup> ):		2,171	UMID. ÓTIMA(%):	7,71	I.S.C.(%):	29,01
					EXPANSÃO(%):	0,00

Figura 73 – Ensaio de ISC – Material Fresado Amostra 02

<b>ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)</b>						
RODOVIA RSC-480					DATA 27.05.2019	
MATERIAL FRESADO PURO		AMOSTRA 02		ENERGIA PROCTOR MODIFICADO		
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA						
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO
Cápsula nº				411		451
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)		295,30		196,12		199,96
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)		290,10		185,29		188,46
Peso da Água(g)		5,20		10,83		11,50
Peso da Cápsula(g)				46,08		42,72
Peso do Solo Seco(g)		290,10		139,21		145,74
Teor de Umidade(%)		1,8		7,80		7,90
Umidade Média(%)		1,8		7,85		
UMID. ÓTIMA(%): 7,7		AMOSTRA ÚMIDA(g): 7.320		ÁGUA A ADICIONAR(ml): 425		
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME			EXPANSÃO			
DENSIDADE		MOLDAGEM	SATURADO	Altura do Corpo de Prova (mm)		
Cilindro nº		10		113,7		
Água Adicionada(ml)		425		DATA		
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)		9.647		Tempo Decorrido em dias		
Peso do Cilindro(g)		5.030		Expansão Lida em mm		
Peso do Solo Úmido(g)		4.617		Expansão em Porcentagem		
Volume do Cilindro(cm <sup>3</sup> )		2.063		0,00		
Massa Aparente Úmida(g/cm <sup>3</sup> )		2,238		0,00		
Massa. Aparente Seca(g/cm <sup>3</sup> )		2,075		0,00		
31.05.2019		4		0,00		
ENSAIO DE PENETRAÇÃO				GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO		
Constante do Anel (3542)		0,09951				
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura 0,001mm	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )			
0,5	0,64	28	2,8			
1,0	1,27	82	8,2			
1,5	1,91	130	12,9			
2,0	2,54	175	17,4			
3,0	3,81	253	25,2			
4,0	5,08	319	31,7			
6,0	7,62	432	43,0			
8,0	10,16					
10,0	12,70					
CÁLCULO DO I.S.C.						
Leitura (mm)		pressão aplic. Corrigida		I.S.C. (%)		
2,54		17,4		27,4		
5,08		31,7		31,4		
MASSA ESP. SECA MÁX. (g/cm <sup>3</sup> ):		2,171		UMID. ÓTIMA (%): 7,71		I.S.C. (%): 31,4
				EXPANSÃO (%): 0,00		



Figura 74 – Ensaio de ISC – Material Fresado Amostra 03

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)						
RODOVIA RSC-480					DATA 27.05.2019	
MATERIAL FRESADO PURO		AMOSTRA 03		ENERGIA PROCTOR MODIFICADO		
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA						
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APOS SATURAÇÃO
Cápsula nº				114    144		
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)		285,60		139,47    152,64		
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)		281,50		133,45    142,70		
Peso da Água(g)		4,10		6,02    9,94		
Peso da Cápsula(g)				22,98    23,65		
Peso do Solo Seco(g)		281,50		110,47    119,05		
Teor de Umidade(%)		1,5		5,40    8,30		
Umidade Média(%)		1,5		6,85		
UMID. ÓTIMA(%):		7,71		AMOSTRA ÚMIDA(g):		7.340
				ÁGUA A ADICIONAR(ml):		449
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME			EXPANSÃO			
DENSIDADE		MOLDAGEM		SATURADO		Altura do Corpo de Prova (mm)
		6				113,7
Cilindro nº		6		DATA		Tempo Decorrido em dias
Água Adicionada(ml)		449				Expansão Lida em mm
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)		9.816				Expansão em Porcentagem
Peso do Cilindro(g)		5.140		27.05.2019		0
Peso do Solo Úmido(g)		4.676		28.05.2019		1
Volume do Cilindro(cm <sup>3</sup> )		2.063		29.05.2019		2
Massa Aparente Úmida(g/cm <sup>3</sup> )		2,266		30.05.2019		3
Massa Aparente Seca(g/cm <sup>3</sup> )		2,121		31.05.2019		4
ENSAIO DE PENETRAÇÃO				GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO		
Constante do Anel (3542)		0,09951				
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )			
0,5	0,64	21	2,1			
1,0	1,27	55	5,5			
1,5	1,91	95	9,5			
2,0	2,54	135	13,4			
3,0	3,81	210	20,9			
4,0	5,08	277	27,6			
6,0	7,62	398	39,6			
8,0	10,16					
10,0	12,70					
CÁLCULO DO I.S.C.						
Leitura (mm)	pressão aplic.		pressão Corrigida	I.S.C. (%)		
2,54	13,4		15,8	22,4		
5,08	27,6		29,4	27,9		
MASSA ESP. SECA MÁX. (g/cm <sup>3</sup> ):		2,171		UMID. ÓTIMA (%):		7,71
				I.S.C. (%):		27,9
				EXPANSÃO (%):		0,00

Figura 75 – Ensaio de ISC – Mistura 70/30 Amostra 01

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)						
OBRA		TRECHO			DATA	
RSC-480		km 5,2 - km 5,4			03.06.2019	
MATERIAL		AMOSTRA		ENERGIA DE COMPACTAÇÃO		
70% FRESADO, 20% FILLER, 10% PEDRISCO 1/2"		01		PROCTOR MODIFICADO		
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA						
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO
Cápsula nº				147		108
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)		151,00		148,50		98,92
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)		149,30		146,90		94,29
Peso da Água(g)		1,70		1,60		4,63
Peso da Cápsula(g)				23,22		22,86
Peso do Solo Seco(g)		149,30		146,90		71,07
Teor de Umidade(%)		1,1		1,1		6,5
Umidade Média(%)		1,1		6,3		
UMID. ÓTIMA(%):		6,46		AMOSTRA ÚMIDA(g):		337
				6.349		ÁGUA A ADICIONAR(ml):
						337
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME			EXPANSÃO			
DENSIDADE		MOLDAGEM	SATURADO	Altura do Corpo de Prova(mm)		
		1		113,7		
Cilindro nº		1		DATA	Tempo Decorrido em dias	Expansão Lida em mm
Água Adicionada(ml)		337				Expansão em Porcentagem
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)		9.854				
Peso do Cilindro(g)		5.020		03.06.2019	0	0,00
Peso do Solo Úmido(g)		4.834		04.06.2019	1	0,00
Volume do Cilindro(cm <sup>3</sup> )		2.063		05.06.2019	2	0,00
Massa Aparente Úmida(g/cm <sup>3</sup> )		2,343		06.06.2019	3	0,00
Massa Aparente Seca(g/cm <sup>3</sup> )		2,205		07.06.2019	4	0,00
ENSAIO DE PENETRAÇÃO			GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO			
Constante do Anel (3542)		0,09951				
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )			
0,5	0,64	160	15,9			
1,0	1,27	250	24,9			
1,5	1,91	310	30,8			
2,0	2,54	430	42,8			
3,0	3,81	528	52,5			
4,0	5,08	588	58,5			
6,0	7,62	730	72,6			
8,0	10,16					
10,0	12,70					
CÁLCULO DO I.S.C.						
Leitura (mm)	pressão aplic.		pressão Corrigida		I.S.C. (%)	
2,54	42,8		44,8		63,8	
5,08	58,5		60,0		56,9	
MASSA ESPECÍFICA SECA MÁX. (g/cm <sup>3</sup> ):		2,226	UM ID. ÓTIMA (%):	6,46	I.S.C. (%):	63,8
						EXPANSÃO (%):
						0,00

Figura 76 – Ensaio de ISC – Mistura 70/30 - Amostra 02

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)						
OBRA RSC-480		TRECHO km 5,2 - km 5,4			DATA 03.06.2019	
MATERIAL 70% FRESADO, 20% FILLER, 10% PEDRISCO 1/2"		AMOSTRA 02		ENERGIA DE COMPACTAÇÃO PROCTOR MODIFICADO		
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA						
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO
Cápsula nº				190	191	
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)	147,20	135,90	119,42	122,07		
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)	145,60	134,40	113,88	116,54		
Peso da Água(g)	1,60	1,50	5,54	5,53		
Peso da Cápsula(g)			23,12	22,54		
Peso do Solo Seco(g)	145,60	134,40	90,76	94,00		
Teor de Umidade(%)	1,1	1,1	6,1	5,9		
Umidade Média(%)	1,1		6,0			
UMID. ÓTIMA(%):	6,46	AMOSTRA ÚMIDA(g):	6.500	ÁGUA A ADICIONAR(ml):	345	
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME				EXPANSÃO		
DENSIDADE		MOLDAGEM	SATURADO	Altura do Corpo de Prova(mm)		113,7
Cilindro nº	2			DATA	Tempo Decorrido em dias	Expansão Lida em mm
Água Adicionada(ml)	345					Expansão em Porcentagem
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)	9.882					
Peso do Cilindro(g)	5.006			03.06.2019	0	0,00
Peso do Solo Úmido(g)	4.876			04.06.2019	1	0,00
Volume do Cilindro(cm³)	2.063			05.06.2019	2	0,00
Massa Aparente Úmida(g/cm³)	2.364			06.06.2019	3	0,00
Massa Aparente Seca(g/cm³)	2.230			07.06.2019	4	0,00
ENSAIO DE PENETRAÇÃO				GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO		
Constante do Anel (3542)		0,09951				
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm²)			
0,5	0,64	128	12,7			
1,0	1,27	245	24,4			
1,5	1,91	380	37,8			
2,0	2,54	450	44,8			
3,0	3,81	529	52,6			
4,0	5,08	727	72,3			
6,0	7,62	937	93,2			
8,0	10,16					
10,0	12,70					
CÁLCULO DO I.S.C.						
Leitura (mm)	pressão aplic.		pressão Corrigida		I.S.C. (%)	
2,54	44,8	45,5		64,7		
5,08	72,3	73,3		69,6		
MASSA ESPECÍFICA SECA MÁX. (g/cm³):		2,226	UM ID. ÓTIM A (%):	6,46	I.S.C. (.(%):	69,6
					EXPANSÃO (%):	0,00

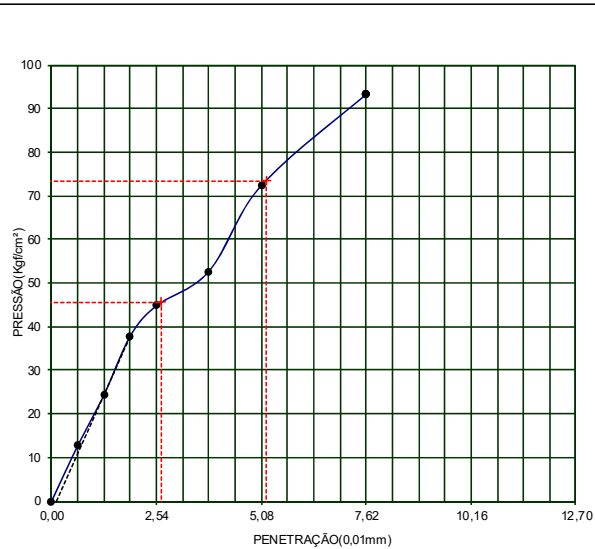


Figura 77 – Ensaio de ISC – Mistura 70/30 - Amostra 03

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)						
OBRA		TRECHO			DATA	
RSC-480		km 5,2 - km 5,4			03.06.2019	
MATERIAL		AMOSTRA		ENERGIA DE COMPACTAÇÃO		
70% FRESADO, 20% FILLER, 10% PEDRISCO 1/2"		3		PROCTOR MODIFICADO		
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA						
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO
Cápsula nº				180		189
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)		178,50		159,60		124,79
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)		176,80		158,00		119,05
Peso da Água(g)		1,70		1,60		5,74
Peso da Cápsula(g)				23,98		23,12
Peso do Solo Seco(g)		176,80		158,00		95,07
Teor de Umidade(%)		1,0		1,0		6,0
Umidade Média(%)		1,0		6,0		
UMID. ÓTIMA(%):		6,46		AMOSTRA ÚMIDA(g):		6.500
				ÁGUA A ADICIONAR(ml):		351
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME			EXPANSÃO			
DENSIDADE		MOLDAGEM	SATURADO	Altura do Corpo de Prova(mm)		
Cilindro nº		9		113,7		
Água Adicionada(ml)		351		DATA	Tempo Decorrido em dias	Expansão Lida em mm
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)		9.789				Expansão em Porcentagem
Peso do Cilindro(g)		4.838		03.06.2019	0	0,00
Peso do Solo Úmido(g)		4.951		04.06.2019	1	0,00
Volume do Cilindro(cm³)		2.090		05.06.2019	2	0,00
Massa Aparente Úmida(g/cm³)		2,369		06.06.2019	3	0,00
Massa Aparente Seca(g/cm³)		2,235		07.06.2019	4	0,00
ENSAIO DE PENETRAÇÃO				GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO		
Constante do Anel (3542)		0,09951				
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm²)			
0,5	0,64	20	2,0			
1,0	1,27	60	6,0			
1,5	1,91	135	13,4			
2,0	2,54	226	22,5			
3,0	3,81	460	45,8			
4,0	5,08	595	59,2			
6,0	7,62	1036	103,1			
8,0	10,16					
10,0	12,70					
CÁLCULO DO I.S.C.						
Leitura (mm)	pressão		I.S.C. (%)			
	aplic.	Corrigida				
2,54	22,5	46,2	65,8			
5,08	59,2	81,9	77,7			
MASSA ESPECÍFICA SECA MÁX. (g/cm³):		2,226	UMID. ÓTIMA (%):	6,46	I.S.C. (%):	77,7
					EXPANSÃO (%):	0,00

Figura 78 – Ensaio de ISC – Mistura 50/50 - Amostra 01

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)						
OBRA RSC-480		TRECHO km 5,2 - km 5,4		DATA 10.06.2019		
MATERIAL 50% FRESADO, 20% FILLER, 30% PEDRISCO 1/2"		AMOSTRA 01		ENERGIA DE COMPACTAÇÃO PROCTOR MODIFICADO		
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA						
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO
Cápsula nº				181	45	
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)	178,50	159,60	139,53	148,48		
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)	176,80	158,00	132,55	141,33		
Peso da Água(g)	1,70	1,60	6,98	7,15		
Peso da Cápsula(g)			24,29	22,40		
Peso do Solo Seco(g)	176,80	158,00	108,26	118,93		
Teor de Umidade(%)	1,0	1,0	6,4	6,0		
Umidade Média(%)	1,0		6,2			
UMID. ÓTIMA(%):	6,33	AMOSTRA ÚMIDA(g):	6.322	ÁGUA A ADICIONAR(ml):	334	
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME			EXPANSÃO			
DENSIDADE		MOLDAGEM	SATURADO	Altura do Corpo de Prova(mm)		113,7
Cilindro nº		7		DATA	Tempo Decorrido em dias	Expansão Lida em mm
Água Adicionada(ml)		334				Expansão em Porcentagem
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)		10.087				
Peso do Cilindro(g)		5.111		10.06.2019	0	0,00
Peso do Solo Úmido(g)		4.976		11.06.2019	1	0,00
Volume do Cilindro(cm <sup>3</sup> )		2.063		12.06.2019	2	0,00
Massa Aparente Úmida(g/cm <sup>3</sup> )		2,412		13.06.2019	3	0,00
Massa Aparente Seca(g/cm <sup>3</sup> )		2,271		14.06.2019	4	0,00
ENSAIO DE PENETRAÇÃO			GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO			
Constante do Anel (3542)		0,09951				
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )			
0,5	0,64	38	3,8			
1,0	1,27	157	15,6			
1,5	1,91	333	33,1			
2,0	2,54	506	50,4			
3,0	3,81	835	83,1			
4,0	5,08	1174	116,8			
6,0	7,62	1566	155,8			
8,0	10,16					
10,0	12,70					
CÁLCULO DO I.S.C.						
Leitura (mm)	pressão aplic.		pressão Corrigida		I.S.C. (%)	
2,54	50,4	68,5	97,4			
5,08	116,8	127,6	121,1			
MASSA ESPECÍFICA SECA MÁX. (g/cm <sup>3</sup> ):		2,277	UMID. ÓTIMA (%):	6,3	I.S.C. (%):	121,1
					EXPANSÃO (%):	0,00

Figura 79 – Ensaio de ISC – Mistura 50/50 - Amostra 02

<b>ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)</b>						
OBRA		TRECHO			DATA	
RSC-480		km 5,2 - km 5,4			10.06.2019	
MATERIAL		AMOSTRA		MATERIAL		
50% FRESADO, 20% FILLER, 30% PEDRISCO 1/2"		2		PROCTOR MODIFICADO		
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA						
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO
Cápsula nº				222		128
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)		147,20		135,90		123,10
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)		145,60		134,40		116,00
Peso da Água(g)		1,60		1,50		7,10
Peso da Cápsula(g)						13,09
Peso do Solo Seco(g)		145,60		134,40		102,91
Teor de Umidade(%)		1,1		1,1		6,9
Umidade Média(%)		1,1		6,9		
UMID. ÓTIMA(%):		6,3		AMOSTRA ÚMIDA(g):		ÁGUA A ADICIONAR(ml):
				6.500		336
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME				EXPANSÃO		
DENSIDADE		MOLDAGEM	SATURADO	Altura do Corpo de Prova(mm)		
		6		113,7		
Cilindro nº		6		DATA	Tempo Decorrido em dias	Expansão Lida em mm
Água Adicionada(ml)		336				Expansão em Porcentagem
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)		10.008		10.06.2019	0	0,00
Peso do Cilindro(g)		5.140		11.06.2019	1	0,00
Peso do Solo Úmido(g)		4.868		12.06.2019	2	0,00
Volume do Cilindro(cm³)		2.063		13.06.2019	3	0,00
Massa Aparente Úmida(g/cm³)		2,360		14.06.2019	4	0,00
Massa Aparente Seca(g/cm³)		2,207				0,00
ENSAIO DE PENETRAÇÃO				GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO		
Constante do Anel (3542)				0,09951		
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm²)			
0,5	0,64	125	12,4			
1,0	1,27	268	26,7			
1,5	1,91	425	42,3			
2,0	2,54	564	56,1			
3,0	3,81	800	79,6			
4,0	5,08	1021	101,6			
6,0	7,62	1354	134,7			
8,0	10,16					
10,0	12,70					
CÁLCULO DO I.S.C.						
Leitura (mm)	pressão aplic. / Corrigida		I.S.C. (%)			
2,54	56,1	59,6	84,7			
5,08	101,6	104,0	98,7			
MASSA ESPECÍFICA SECA MÁX. (g/cm³):		2,277		UMID. ÓTIMA (%):		6,33
				I.S.C. (%):		98,7
				EXPANSÃO (%):		0,00

Figura 80 – Ensaio de ISC – Mistura 50/50 - Amostra 03

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (I.S.C)							
OBRA		TRECHO			DATA		
RSC-480		km 5,2 - km 5,4			10.06.2019		
MATERIAL		AMOSTRA		ENERGIA DE COMPACTAÇÃO			
50% FRESADO, 20% FILLER, 30% PEDRISCO 1/2"		3		PROCTOR MODIFICADO			
PREPARAÇÃO DA AMOSTRA							
DETERMINAÇÕES DE UMIDADE		HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO	
Cápsula nº				77		94	
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)		178,50		159,60		138,37	
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)		176,80		158,00		131,19	
Peso da Água(g)		1,70		1,60		7,18	
Peso da Cápsula(g)				23,47		22,10	
Peso do Solo Seco(g)		176,80		158,00		107,72	
Teor de Umidade(%)		1,0		1,0		6,7	
Umidade Média(%)		1,0		6,6			
UMID. ÓTIMA(%):		6,33		AMOSTRA ÚMIDA(g):		6.500	
				ÁGUA A ADICIONAR(ml):		343	
COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA - DNIT 172/2016-ME				EXPANSÃO			
DENSIDADE		MOLDAGEM	SATURADO	Altura do Corpo de Prova(mm)		113,7	
Cilindro nº		4		DATA	Tempo Decorrido em dias	Expansão Lida em mm	
Água Adicionada(ml)		343				Expansão em Porcentagem	
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)		9.978		10.06.2019	0	0,00	
Peso do Cilindro(g)		5.027		11.06.2019	1	0,00	
Peso do Solo Úmido(g)		4.951		12.06.2019	2	0,00	
Volume do Cilindro(cm³)		2.063		13.06.2019	3	0,00	
Massa Aparente Úmida(g/cm³)		2.400		14.06.2019	4	0,00	
Massa Aparente Seca(g/cm³)		2,252				0,00	
ENSAIO DE PENETRAÇÃO				GRÁFICO PRESSÃO X PENETRAÇÃO			
Constante do Anel (3542)		0,09951					
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm²)				
0,5	0,64	33	3,3				
1,0	1,27	110	10,9				
1,5	1,91	219	21,8				
2,0	2,54	350	34,8				
3,0	3,81	646	64,3				
4,0	5,08	930	92,5				
6,0	7,62	1390	138,3				
8,0	10,16						
10,0	12,70						
CÁLCULO DO I.S.C.							
Leitura		pressão					I.S.C.
(mm)	aplic.	Corrigida	(%)				
2,54	34,8	58,9	83,8				
5,08	92,5	111,3	105,6				
MASSA ESPECÍFICA SECA MÁX. (g/cm³):		2,277	UMID. ÓTIMA (%):	6,33	I.S.C. (%):	105,6	
					EXPANSÃO (%):	0,00	

## APÊNDICE 5: Resultados das Análises Mecânicas - Programa *Everstress*

Figura 81 – Análise mistura 70/30 – 3% cimento

Clayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: Análise70\_3%.19

No of Layers: 4                      No of Loads: 2                      No of X-Y Evaluation Points:  
2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.30	6.000	4000.00
2	.20	40.000	8648.00
3	.40	16.000	350.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1                      X-Position (cm): .000                      Y-Position (cm):  
.000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy
45.999	2	188.55	216.80		-9.74		.00
2.16		.00					

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz
45.999	2	17.01	20.93		-10.50		-2.723
.000		120.334					

(microns)

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer *	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (10 <sup>-6</sup> )	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3
45.999	2	-9.76	188.57		216.80		-10.50
17.02		20.93					

Line

Line

Location No: 2                      X-Position (cm): 15.000                      Y-Position (cm):  
.000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy
--------------------	------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-----



45.999 2	205.35	228.65	-10.31	.00			
.00	.00						
Line							
cNormal Strains and Deflections							
Z-Position	Layer	Exx	Eyy	Ezz	Ux	Uy	Uz
(cm) *	(10 <sup>-6</sup> )	(10 <sup>-6</sup> )	(10 <sup>-6</sup> )	(microns)		(microns)	
(microns)							
45.999 2	18.70	21.93	-11.23	.000			
.000	121.635						
Line							
cPrincipal Stresses and Strains							
Z-Position	Layer	S1	S2	S3	E1	E2	E3
(cm) *	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(10 <sup>-6</sup> )	(10 <sup>-6</sup> )	(10 <sup>-6</sup> )	
45.999 2	-10.31	205.35	228.65	-11.23			
18.70	21.93						

Figura 82 – Análise mistura 70/30 – 6% cimento

Clayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: Análise70\_6%.8

No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points:  
2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.30	5.000	4000.00
2	.20	31.000	13637.00
3	.40	16.000	350.00
4	.45	*	100.00

Load No *	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.795
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.795

Line

Line

Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm):  
.000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy
35.999	2	321.10	377.66		-12.14		.00
2.54		.00					

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
35.999	2	18.19	23.16		-11.14		-2.870
.000		134.858					

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer *	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (10 <sup>-6</sup> )	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3
35.999	2	-12.16	321.12		377.66		-11.14
18.19		23.16					

Line

Line

Location No: 2      X-Position (cm): 15.000      Y-Position (cm):  
.000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy
--------------------	------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-----

35.999 2	342.64	398.27	-12.69	.00
.00	.00			

Line  
cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm) *	Layer	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (microns)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz
35.999 2	19.47	24.37	-11.80	.000			
.000	136.486						

Line  
cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm) *	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (10 <sup>-6</sup> )	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3
35.999 2	-12.69	342.64	398.27	-11.80			
19.47	24.37						

Figura 83 – Análise mistura 50/50 – 3% cimento

CLayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: Análise50\_3%.12

No of Layers: 4                      No of Loads: 2                      No of X-Y Evaluation Points:  
2

Layer *	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	.30	5.000	4000.00
2	.20	36.000	11403.00
3	.40	16.000	350.00
4	.45	*	100.00

Load *	No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Y-Position (N)	(kPa)	Load (cm)	Pressure	Radius
1		.00	.00	20500.0		560.00		10.795
2		30.00	.00	20500.0		560.00		10.795

Line

Line

Location No: 1                      X-Position (cm): .000                      Y-Position (cm):  
.000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy
40.999 2		246.50	286.30		-10.34		.00
2.22		.00					

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
40.999 2		16.78	20.97		-10.25		-2.672
.000		124.356					

Line

Line

Line

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer *	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (10 <sup>-6</sup> )	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3
40.999 2		-10.36	246.52		286.30		-10.25
16.78		20.97					

Line

Line

Location No: 2                      X-Position (cm): 15.000                      Y-Position (cm):  
.000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy
--------------------	------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-----

40.999 2	266.58	302.13	-10.89	.00
.00	.00			

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm) *	Layer	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
----------------------	-------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-----------------	-----------------	-----------------

40.999 2	18.27	22.01	-10.93	.000
.000	125.732			

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm) *	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (10 <sup>-6</sup> )	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
----------------------	-------	-------------	-------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

40.999 2	-10.89	266.58	302.13	-10.93
18.27	22.01			

Figura 84 – Análise mistura 50/50 – 6% cimento

```

Clayered Elastic Analysis by EverStress for Windows
Line
Title: Análise50_6%.7
No of Layers: 4      No of Loads: 2      No of X-Y Evaluation Points:
2

Layer  Poisson's      Thickness      Moduli(1)
*      Ratio   (cm)   (MPa)

1      .30     4.000  4000.00
2      .20     30.000 14791.00
3      .40     16.000  350.00
4      .45     *      100.00

Load No X-Position      Y-Position      Load      Pressure      Radius
*      (cm)   (cm)   (N)   (kPa)   (cm)

1      .00     .00   20500.0   560.00   10.795
2      30.00   .00   20500.0   560.00   10.795

Line
Line
Location No: 1      X-Position (cm): .000      Y-Position (cm):
.000
Line
cNormal Stresses
Z-Position      Layer  Sxx   Syy   Szz   Syz   Sxz   Sxy
(cm) *          (kPa) (kPa) (kPa) (kPa) (kPa) (kPa)

33.999 2      354.53      418.76      -12.66      .00
2.62      .00

Line
cNormal Strains and Deflections
Z-Position      Layer  Exx   Eyy   Ezz   Ux   Uy   Uz
(cm) *          (10^-6) (10^-6) (10^-6) (microns) (microns)

33.999 2      18.48      23.69      -11.31      -2.901
.000      137.521

Line
cPrincipal Stresses and Strains
Z-Position      Layer  S1   S2   S3   E1   E2   E3
(cm) *          (kPa) (kPa) (kPa) (10^-6) (10^-6) (10^-6)

33.999 2      -12.68      354.55      418.76      -11.31
18.48      23.69

Line
Line
Location No: 2      X-Position (cm): 15.000      Y-Position (cm):
.000
Line
cNormal Stresses
Z-Position      Layer  Sxx   Syy   Szz   Syz   Sxz   Sxy
(cm) *          (kPa) (kPa) (kPa) (kPa) (kPa) (kPa)

```

33.999 2	375.39	441.14	-13.19	.00
.00	.00			

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm) *	Layer	Exx (10 <sup>-6</sup> )	Eyy (10 <sup>-6</sup> )	Ezz (10 <sup>-6</sup> )	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
----------------------	-------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-----------------	-----------------	-----------------

33.999 2	19.59	24.93	-11.93	.000
.000	139.215			

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm) *	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (10 <sup>-6</sup> )	E1 (10 <sup>-6</sup> )	E2 (10 <sup>-6</sup> )	E3 (10 <sup>-6</sup> )
----------------------	-------	-------------	-------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

33.999 2	-13.19	375.39	441.14	-11.93
19.59	24.93			