

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

**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 DE MESTRADO

Gustavo Menegusso Pires

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**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**

Gustavo Menegusso Pires

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

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht
Coorientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Santa Maria, RS, Brasil

2014

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

Pires, Gustavo Menegusso

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 / Gustavo Menegusso Pires.-2014.

162 p. ; 30cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht

Coorientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2014

1. Pavimentos 2. Reciclagem 3. Material fresado 4. Cimento Portland 5. Cinza de casca de arroz I. Specht, Luciano Pivoto II. Pinheiro, Rinaldo José Barbosa III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**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**

elaborada por
Gustavo Menegusso Pires

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Luciano Pivoto Specht, D.Sc.
(Presidente/Orientador)

Rinaldo José Barbosa Pinheiro, D.Sc. (UFSM)
(Coorientador)

Tatiana Cureau Cervo, D.Sc. (UFSM)

Jorge Augusto Pereira Ceratti, D.Sc. (UFRGS)

Santa Maria, 17 de Julho de 2014.

*Aos meus pais Francisco e
Ivete, e à minha noiva Emilie.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer toda minha família, pelo incentivo e pela confiança em mim depositada, e a minha noiva Emilie pelo apoio e compreensão em todos os momentos desta etapa.

Ao Professor Dr. Luciano Pivoto Specht, orientador deste trabalho, pela oportunidade concedida, pelo apoio em todos os momentos, pela dedicação e conhecimento compartilhado.

Ao Professor Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro, coorientador deste trabalho e coordenador do PPGEC, pela oportunidade e importante colaboração para realização deste trabalho.

Aos professores examinadores, Professor Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti e Professora Dra. Tatiana Cureau Cervo, por gentilmente aceitarem fazer parte da banca de avaliação e pelas considerações apontadas para melhoria deste estudo.

A todos os integrantes do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária – GEPPASV, desde a iniciação científica até colegas de pós-graduação, pelo auxílio na execução dos ensaios, pelos momentos de descontração e pela amizade.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC pela cessão dos equipamentos. E a todos os seus funcionários pela disponibilidade e atenção sempre que necessário.

Ao Laboratório de Pavimentação – LAPAV da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela disponibilidade de equipamentos para realização de ensaios.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo auxílio financeiro na realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Tecnologia e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realizar o curso.

A empresa EKOSIL, em especial ao Sr. Odilo, pelo fornecimento de material para estudo neste trabalho.

A todos, o meu muito obrigado!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

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

AUTOR: GUSTAVO MENEGUSSO PIRES

ORIENTADOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT

COORIENTADOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 17 de Julho de 2014.

O transporte rodoviário é de grande importância para muitos países, no Brasil isso pode ser ainda mais extremo devido à concentração da movimentação das cargas através deste modal. Sabemos também que os custos de manutenção são elevados, forçando os gestores e pesquisadores a encontrar sempre novas alternativas para melhorar o aproveitamento dos materiais, diminuir o consumo de energia, agilizar as intervenções de restauração, entre outros. Outro fator importante que se destaca é a questão ambiental, onde é diretamente afetada nas construções e manutenções de rodovias, seja no consumo de materiais naturais, nas movimentações de terras, nos combustíveis utilizados, etc. Assim, torna-se viável o estudo de reaproveitamento dos materiais antigos das rodovias, na execução da reciclagem do pavimento deteriorado, pois todo o material poderá ser utilizado para construção de uma nova camada. Portanto, o material asfáltico do pavimento deteriorado, o fresado, é o objetivo de estudo desta pesquisa, visando a estabilização granulométrica e química, esta última com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz. Esta pesquisa objetivou avaliar, através de ensaios laboratoriais, a viabilidade da utilização de material fresado puro e estabilizado (mecânica, granulométrica e quimicamente) em camadas de pavimentos flexíveis. Os materiais fresados são oriundos da BR-290 e da ERS-509. Foi realizada estabilização granulométrica, sendo determinado o teor de 70% de material fresado e 30% de agregado natural. Para ensaio de resistência à compressão simples foram moldados em corpos-de-prova de 10x20 cm com diferentes teores de cimento Portland (CP-IV 32), sendo determinados os teores de 4,86% (BR-290) e 5,37% (ERS-569) a partir da resistência à compressão de 2,1 MPa aos 28 dias. A partir dos resultados obtidos foram moldados corpos de prova para ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de resiliência; sendo nestes substituído em massa o CP-IV 32 em 15, 30 e 50% por cinza de casca de arroz moída (CCA #325 e CCA #500), colocados em câmara úmida por 7, 28 e 160 dias. A análise dos resultados mostrou que o teor de 15% de CCA alcançou valores muito próximos das misturas de referência. O desempenho satisfatório corrobora com a possibilidade de abranger os estudos destes materiais.

Palavras-chave: Pavimentos, reciclagem, material fresado, cimento Portland, cinza de casca de arroz.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Postgraduate Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

STUDY OF GRANULOMETRIC AND CHEMICAL STABILIZATION IN RAP WITH PORTLAND CEMENT AND RICE HUSK ASH ADDITION FOR APPLICATION IN PAVEMENT LAYERS

AUTHOR: PIRES, GUSTAVO MENEGUSSO

SUPERVISOR: SPECHT, LUCIANO PIVOTO

CO-SUPERVISOR: PINHEIRO, RINALDO JOSÉ BARBOSA

Date and place of Defense: Santa Maria, July 17, 2014.

Road transport is of great importance for many countries, in Brazil it can be even more extreme, due to the concentration of cargo through this modal. We also know that maintenance costs are elevated, forcing managers and researchers to find new alternatives to increase the utilization of materials, reduce energy consumption, speed up restoration interventions, among others. Besides the high costs, another important factor that stands out is the environmental issue, which is directly affected in the construction and maintenance of highways, whether using natural materials, movements of soils, in the fuel used by the equipment, etc. Thus, it becomes feasible to study reuse of old materials in the execution of highways recycling of deteriorated pavement, because all the material can be used for construction of a new layer, and with little addition of new materials for stabilization, reducing the consumption. Therefore, the material deteriorated asphalt pavement, the Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), is the objective of this research, aiming to stabilize pavement layers in two ways, the particle size and chemical stabilization, the latter with the addition of Portland cement and rice husk ash. This research aims to evaluate, through laboratory testing, the feasibility of using pure and stabilized milled material (mechanical, chemical and particle size) in layers of flexible pavements. The milled materials are from BR-290 and ERS-509. Particle size stabilization was performed and determined the level of 70% of milled material and 30% of natural aggregate. For testing of compressive strength were molded into test specimens of 10x20 cm with different levels of Portland cement (CP IV-32), and determine the content of 4,86% (BR-290) and 5,37% (ERS-569) from the compressive strength of 2.1 MPa at 28 days. From the results obtained, specimens were molded for testing the Axial compressive strength, tensile strength by diametrical compression and resilient modulus; in these specimens, the cement was replaced by Rice Husk Ash (mesh #325 and #500) in ratios of 15, 30 and 50% by weight of cement content, and put into moist chamber for 7, 28 and 160 curing days. The results showed that the amount of 15% of CCA reached values very close to the reference mixtures. The satisfactory performance confirms the possibility to cover studies of these materials.

Keywords: paving, recycling, RAP, Portland cement, rice husk ash.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Panorama do conhecimento e utilização de melhoria de solos no Brasil. | 28 |
| Figura 2 – Distribuição granulométrica e proporção de finos | 29 |
| Figura 3 – Quadro de classificação dos processos de reciclagem de pavimentos.... | 42 |
| Figura 4 – Vista do cilindro fresador de uma máquina fresadora | 47 |
| Figura 5 – Superfície resultante de fresagem a frio..... | 47 |
| Figura 6 – Fresadora W 35 DC da Wirtgen | 48 |
| Figura 7 – Fresadora W 1000 da Wirtgen | 49 |
| Figura 8 – Fresadora W 1900 da Wirtgen | 50 |
| Figura 9 – Critérios de seleção do processo de reciclagem a frio in situ..... | 51 |
| Figura 10 – Comparativo de construção de base nova e reciclagem profunda..... | 52 |
| Figura 11 – Reciclagem parcial a frio in situ..... | 53 |
| Figura 12 – Método da máquina única <i>single-pass</i> | 54 |
| Figura 13 – Método do Trem de Equipamentos <i>single-pass</i> | 55 |
| Figura 14 – Produção da espuma de asfalto..... | 59 |
| Figura 15 – Esquema de reciclagem <i>in situ</i> com cimento Portland | 60 |
| Figura 16 – Métodos de espalhamento do cimento Portland: Manual (a) e mecanizado (b). | 60 |
| Figura 17 – Deformação permanente..... | 64 |
| Figura 18 – Afundamento em trilha de roda com presença de água na superfície ... | 64 |
| Figura 19 – Revestimento em avançado grau de fissuração | 65 |
| Figura 20 – Esquema do processo de reciclagem de superfície | 68 |
| Figura 21 – Processo de reciclagem de superfície..... | 69 |
| Figura 22 – Esquema do processo de repavimentação por <i>multiple-pass</i> | 70 |
| Figura 23 – Esquema do processo de repavimentação por <i>single-pass</i> | 71 |
| Figura 24 – Processo de repavimentação | 71 |
| Figura 25 – Esquema do processo de remistura..... | 72 |
| Figura 26 – Vista parcial do processo de remistura | 73 |
| Figura 27 – Esquema dos materiais de uma mistura asfáltica reciclada a quente ... | 74 |
| Figura 28 – Esquema do processo de reciclagem a quente em usina. | 75 |
| Figura 29 – Esquema do processo no interior de um TSM paralelo..... | 77 |
| Figura 30 – Tambor secador misturador com entrada central de RAP | 78 |
| Figura 31 – TSM com entrada central de RAP e fluxo contracorrente | 79 |
| Figura 32 – Fluxograma das etapas da pesquisa..... | 81 |
| Figura 33 – Corpos de prova para ensaio de RCS com diferentes teores de cimento Portland..... | 83 |
| Figura 34 – Corpos de prova para RCS com substituição de cimento por CCA | 84 |
| Figura 35 – Corpos de prova para ensaios de RTCD e MR | 85 |
| Figura 36 – Máquina fresadora Caterpillar PM102..... | 87 |
| Figura 37 – Detalhe do cilindro de corte da fresadora Caterpillar PM102 | 87 |
| Figura 38 – Vista do trecho que foi feita a fresagem | 88 |
| Figura 39 – Coleta de amostra diretamente da fresadora | 88 |
| Figura 40 – BR-290 - Distribuição granulométrica do material fresado | 90 |
| Figura 41 – BR-290 – Análise comparativa das curvas granulométricas, antes e AE do ligante..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura 42 – BR-290 - Distribuição granulométrica do material fresado AE do ligante | 92 |
| Figura 43 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do material fresado | 93 |
| Figura 44 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do material fresado AE do ligante | 94 |
| Figura 45 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do material fresado antes e AE | 95 |
| Figura 46 – BR-290 - Distribuição granulométrica dos agregados virgens | 100 |
| Figura 47 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do pó-de-pedra | 101 |
| Figura 48 – Distribuição granulométrica do Cimento CP IV – 32 | 103 |
| Figura 49 – Difratoograma CCA | 106 |
| Figura 50 – Mistura estabilizada granulometricamente em ensaio de compactação | 108 |
| Figura 51 – Relato fotográfico no ensaio de determinação do ISC em mistura estabilizada granulometricamente | 109 |
| Figura 52 – Ensaio de compressão simples | 110 |
| Figura 53 – Ensaio de tração por compressão diametral | 111 |
| Figura 54 – Esquema de materiais e ensaios de determinação do MR | 113 |
| Figura 55 – Ensaio para determinação do módulo de resiliência | 113 |
| Figura 56 – BR-290 - Projeto de estabilização granulométrica | 117 |
| Figura 57 – BR-290 – Estabilização granulométrica e limites BGTC | 118 |
| Figura 58 – ERS-509 - Projeto de estabilização granulométrica | 119 |
| Figura 59 – ERS-509 – Estabilização granulométrica e limites BGTC | 120 |
| Figura 60 – Curvas de compactação Proctor | 123 |
| Figura 61 – Teor de cimento x RCS (MPa) | 127 |
| Figura 62 – Teor CCA #325 x RCS (MPa) | 130 |
| Figura 63 – Teor CCA #500 x RCS (MPa) | 131 |
| Figura 64 – RCS: Efetividade da CCA aos 7 dias | 134 |
| Figura 65 – RCS: Efetividade da CCA aos 28 dias | 134 |
| Figura 66 – Teor CCA #325 x RTCD (MPa) | 136 |
| Figura 67 – Teor CCA #500 x RTCD (MPa) | 136 |
| Figura 68 – Amostra rompida a compressão diametral | 139 |
| Figura 69 – Imagem aproximada de amostra rompida à compressão diametral | 139 |
| Figura 70 – RTCD: Efetividade da CCA aos 7 dias | 142 |
| Figura 71 – RTCD: Efetividade da CCA aos 28 dias | 142 |
| Figura 72 – Teor CCA #325 x MR (MPa) | 144 |
| Figura 73 – Teor CCA #500 x MR (MPa) | 145 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) na Europa | 37 |
| Tabela 2 – N° de CP's para determinação do teor de cimento..... | 82 |
| Tabela 3 – N° de CP's para os ensaios com substituição de cimento por CCA | 84 |
| Tabela 4 – BR-290 - Distribuição granulométrica das amostras de material fresado | 89 |
| Tabela 5 – BR-290 - Distribuição granulométrica das amostras AE do ligante | 90 |
| Tabela 6 – BR-290 – Teor de betume | 92 |
| Tabela 7 – ERS-509 - Distribuição granulométrica das amostras de material fresado | 93 |
| Tabela 8 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do material fresado AE do ligante | 94 |
| Tabela 9 – ERS-509 – Teor de betume..... | 96 |
| Tabela 10 – Densidade máxima medida | 97 |
| Tabela 11 – BR-290 - Características tecnológicas dos agregados utilizados | 99 |
| Tabela 12 – BR-290 - Distribuição granulométrica dos agregados virgens..... | 99 |
| Tabela 13 – ERS-509 - Características tecnológicas dos agregados utilizados..... | 100 |
| Tabela 14 – ERS-509 - Distribuição granulométrica dos agregados virgens | 101 |
| Tabela 15 – Teores dos componentes do cimento Portland pozolânico | 102 |
| Tabela 16 – Características físicas do Cimento CP IV – 32 utilizado na pesquisa.. | 103 |
| Tabela 17 – Distribuição granulométrica por faixa | 104 |
| Tabela 18 – Características químicas do Cimento CP IV – 32..... | 104 |
| Tabela 19 – Características físicas da CCA..... | 106 |
| Tabela 20 – Especificação granulométrica para bases estabilizadas - DNIT 141/2010 | 115 |
| Tabela 21 – Especificação granulométrica BGTC – NBR 11803/2013 | 116 |
| Tabela 22 – BR-290 - Projeto de estabilização granulométrica..... | 117 |
| Tabela 23 – ERS-509 - Projeto de estabilização granulométrica | 119 |
| Tabela 24 – BR-290 - Resultados do ensaio de compactação do fresado..... | 121 |
| Tabela 25 – BR-290 - Resultados do ensaio de compactação da mistura 70/30 | 122 |
| Tabela 26 – ERS-509 - Resultados do ensaio de compactação do fresado | 122 |
| Tabela 27 – ERS-509 - Resultados do ensaio de compactação da mistura 70/30.. | 122 |
| Tabela 28 – Resultados do ensaio de compactação..... | 123 |
| Tabela 29 – Resultados do ensaio de ISC | 124 |
| Tabela 30 – Resultados de RCS para estabilização química..... | 126 |
| Tabela 31 – Teores de cimento Portland e CCA nas misturas..... | 129 |
| Tabela 32 – Taxas de variação nos ensaios de RCS..... | 133 |
| Tabela 33 – RCS: Efetividade da CCA..... | 135 |
| Tabela 34 – Taxas de variação nos ensaios de RTCD | 138 |
| Tabela 35 – Relação RCS para RTCD..... | 140 |
| Tabela 36 – Valores de RTCD a partir da relação RCS / RT | 141 |
| Tabela 37 – RTCD: Efetividade da CCA | 143 |
| Tabela 38 – Taxas de variação nos ensaios de MR..... | 146 |
| Tabela 39 – Relação MR / RT – 7 dias | 146 |
| Tabela 40 – Relação MR / RT – 28 dias | 147 |
| Tabela 41 – Relação MR / RT – 160 dias..... | 147 |

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--|
| ABCP | – Associação Brasileira de Cimento Portland |
| ARRA | – Asphalt Recycling and Reclaiming Association |
| ASTM | – American Society for Testing and Materials |
| BGTC | – Brita graduada tratada com cimento |
| CAP | – Cimento asfáltico de petróleo |
| CBR | – California Bearing Ratio |
| CBUQ | – Concreto betuminoso usinado à quente |
| CCA | – Cinza de casca de arroz |
| CO ₂ | – Dióxido de carbono |
| CP | – Corpo de prova |
| DAER | – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem |
| DNER | – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| EAP | – Emulsão asfáltica |
| FHWA | – Federal Highway Administration |
| ISC | – Índice de Suporte Califórnia |
| LMCC | – Laboratório de Materiais de Construção Civil |
| LMMM | – Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos |
| MPa | – Mega Pascal |
| MR | – Módulo de resiliência |
| NBR | – Norma brasileira |
| PCA | – Portland Cement Association |
| PMF | – Pré-misturado à frio |
| PMQ | – Pré-misturado à quente |
| RAP | – Recycled/Reclaimed asphalt pavement |
| RCS | – Resistência à compressão simples |
| RT | – Resistência à tração |
| RTCD | – Resistência à tração por compressão diametral |
| TSM | – Tambor secador misturador |
| UFSM | – Universidade Federal de Santa Maria |
| UTM | – Universal Testing Machine |

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1. Objetivo geral | 23 |
| 1.2. Objetivos específicos | 23 |
| REVISÃO DE LITERATURA | 25 |
| 2.1. Estabilização de solos | 25 |
| 2.1.1. Estabilização granulométrica | 28 |
| 2.1.2. Estabilização química | 30 |
| 2.2. Reciclagem de pavimentos | 35 |
| 2.2.1. Conceitos | 40 |
| 2.3. Fresagem de pavimentos (cold planing) | 43 |
| 2.4. Técnicas utilizadas na reciclagem de pavimentos à frio | 50 |
| 2.4.1. Reciclagem a frio <i>in situ</i> (espessura parcial) | 52 |
| 2.4.2. Reciclagem a frio <i>in situ</i> com profundidade total (<i>Full Depth Reclamation</i>) | 56 |
| 2.4.3. Restrições e limitações das técnicas de reciclagem a frio <i>in situ</i> | 61 |
| 2.5. Técnicas de reciclagem de pavimentos à quente | 61 |
| 2.5.1. Reciclagem a quente <i>in situ</i> | 62 |
| 2.5.2. Reciclagem à quente em usina estacionária | 74 |
| 2.5.3. Vantagens e Desvantagens | 79 |
| MATERIAIS E MÉTODOS | 81 |
| 3.1. Planejamento da pesquisa | 81 |
| 3.2. Materiais | 85 |
| 3.2.1. Material fresado | 85 |
| 3.2.1.1. Análise granulométrica e teor de betume | 89 |
| 3.2.1.2. Massa específica – metodologia Rice | 96 |
| 3.2.2. Agregados | 97 |
| 3.2.2.1. Caracterização materiais BR-290 | 98 |
| 3.2.2.2. Caracterização materiais ERS-509 | 100 |
| 3.2.3. Cimento | 101 |
| 3.2.4. Cinza de casca de arroz (CCA) | 105 |
| 3.2.5. Água | 107 |
| 3.3. Procedimentos | 107 |
| 3.3.1. Compactação | 107 |
| 3.3.2. Índice de Suporte Califórnia - ISC | 108 |
| 3.3.3. Resistência à compressão Simples (RCS) | 109 |
| 3.3.4. Resistência à tração por compressão diametral (RTCD) | 110 |
| 3.3.5. Módulo de resiliência (MR) | 112 |
| APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS | 115 |
| 4.1. Estabilização mecânica e granulométrica | 115 |
| 4.1.1. Estabilização granulométrica – BR-290 | 116 |
| 4.1.2. Estabilização granulométrica – ERS-509 | 119 |
| 4.2. Compactação | 121 |
| 4.3. Índice de Suporte Califórnia – ISC | 124 |
| 4.4. Estabilização química com cimento Portland | 126 |
| 4.5. Estabilização química com CCA | 128 |
| 4.5.1. Resistência à compressão simples | 129 |

| | |
|--|------------|
| 4.5.2. Resistência à tração por compressão diametral | 135 |
| 4.5.3. Módulo de resiliência | 143 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 149 |
| 5.1. Conclusões | 149 |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros | 152 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 155 |

INTRODUÇÃO

É um fator desconhecido para grande parte da sociedade, a real importância que os transportes exercem no nosso cotidiano. A forma como nos locomovemos, como recebemos nossas correspondências ou como os mais diversos produtos são escoados do seu local de origem até seu destino de consumo. Todos esses processos, dentre muitos outros, são diretamente propiciados por meios de transportes. Para muitos, do ponto de vista econômico, político e militar, o transporte é a indústria mais importante do mundo.

O modal rodoviário tem papel fundamental no desenvolvimento social e econômico mundial, principalmente no Brasil, onde os outros modais não possuem tanta força, sua importância é indiscutível, pois mais da metade das cargas são transportadas através das rodovias. Segundo Medina e Motta (2005) as rodovias transportam 60% da carga e 96% dos passageiros no Brasil.

A rodovia, e em especial o pavimento, em relação à importância do transporte no complexo da atividade socioeconômica, dentro de uma perspectiva de longo prazo (de ordem de grandeza, por exemplo, secular) deve apresentar permanentemente um desempenho satisfatório. Este desempenho se traduz na oferta, ao usuário, de condições de tráfego seguras, confortáveis e econômicas – atendendo aos preceitos de otimização do custo total de transporte (DNIT, 2006).

Segundo a Confederação Nacional do Transporte – CNT (2012), rodovias que apresentam algum tipo de comprometimento do pavimento aumentam o consumo de combustível e contribuem para uma maior emissão de poluentes. Uma rodovia em bom estado de conservação pode resultar em até 5% de economia no consumo de combustível em relação a uma rodovia com estado de conservação inadequado.

Indicações gerais mostram que 46% das rodovias do país estão classificadas como: regulares, ruins ou péssimas. Se o pavimento de todas as rodovias tivesse classificação boa ou ótima em 2012, seria possível uma economia de 616 milhões de litros de óleo diesel, ou seja, R\$ 1,29 bilhão e uma redução da emissão de 1,6 megatonelada de CO₂, principal gás de efeito estufa (CNT, 2012).

Outra questão importante que diz respeito às rodovias são os acidentes que estão diretamente relacionados à qualidade da via, considerando ou não a

imprudência dos motoristas, a CNT divulgou que quase 190 mil acidentes ocorreram no ano de 2011 nas rodovias federais policiadas, onde mais de 28 mil pessoas sofreram lesões graves, outras 8,5 mil vítimas fatais. Os custos com estes acidentes neste ano foram de R\$ 15,7 bilhões, um valor elevado que se aplicado na conservação das rodovias, poderia diminuir o número de vítimas.

Com a utilização frequente das vias, a degradação dos pavimentos é inevitável e causada principalmente pelo alto volume de tráfego, pois veículos circulam nas rodovias com excesso de carga, o que, segundo Medina e Motta (2005) têm como consequência a degradação acelerada dos pavimentos e a sobrecarga de pontes e viadutos, causando um dos danos mais conhecidos do pavimento asfáltico: o trincamento por fadiga, que pode ser definido como o dano causado pelas solicitações repetidas do tráfego, estando este, entre os tipos mais importantes de defeitos levados em consideração quando verificada a necessidade ou não de intervenções de restauração. Toda e qualquer intervenção para restauração de pavimentos tem como objetivo preparar a estrutura e a superfície do pavimento para resistir a ação das intempéries e das cargas do tráfego atuantes durante um novo ciclo de vida útil, garantindo a segurança, o conforto e a economia projetada para os usuários da rodovia neste período.

A crescente conscientização do emprego correto dos recursos naturais, da necessidade da preservação ambiental e redução das emissões de poluentes tem impulsionado a busca de alternativas ambientalmente favoráveis. Ainda que os métodos aplicáveis devam obedecer a questões como a maior durabilidade e a preservação das rodovias, ao tratar das questões ambientais com seu devido merecimento, estes métodos já podem ser enquadrados à frente dos demais. Com isso, os métodos de reciclagem de pavimentos têm ganhado a simpatia dos órgãos de gestão e da sociedade, por serem alternativas técnicas politicamente corretas e economicamente viáveis.

Segundo Bonfim (2011), entre diversos tipos de reciclagem de pavimentos existentes, a fresagem é o procedimento de remoção do material para recuperá-lo e reutilizar em um pavimento existente, sem a utilização do calor como artifício para realização do trabalho. O método possibilita a reobtenção dos agregados em forma granular, mesmo que envoltos por ligante envelhecido, em função do desgaste da camada, com sua granulometria alterada.

Com o passar dos anos cada vez mais pesquisas sobre reciclagem de pavimentos tem sido elaboradas. Ao tratar da reutilização dos materiais disponíveis, como o material asfáltico fresado, e tentar encontrar métodos eficazes de aplicação, surgem outros componentes que podem se tornar importantes. Os estudos avançados em concreto mostram a possibilidade de substituição do cimento Portland pela cinza de casca de arroz (DUART, 2008; ISAIA et al, 2010; SOKOLOVICZ, 2013;), o que nos acena com mais um caminho a ser seguido para estudo em pavimentação. A utilização da CCA em misturas também contribuirá com a reutilização deste material que poderia ter destinação inadequada, mas que se corretamente aplicado pode apresentar resultados satisfatórios.

As principais questões a serem respondidas nesta pesquisa são acerca da utilização do material fresado em camadas de pavimentos e da utilização da CCA junto ao cimento Portland para estabilização química de materiais granulares. O material passível de fresagem está disponível em diversas obras de restauração de pavimentos asfálticos, sendo um material envelhecido que perdeu muitas de suas propriedades. Desta forma, estudar sua capacidade de utilização como material granular para pavimentação se torna pertinente.

1.1 Objetivo geral

A presente pesquisa objetivou avaliar a viabilidade da utilização de material fresado em estabilização de camadas de base e sub-base para pavimentos flexíveis. Através de análises laboratoriais, também buscou avaliar o comportamento desse material quando estabilizado quimicamente com cimento Portland e cinza de casca de arroz, submetidos a procedimentos já existentes para utilização na pavimentação.

1.2 Objetivos específicos

O estudo tem como principais especificidades às citadas a seguir:

- Caracterizar fisicamente o material fresado oriundo de 2 (duas) rodovias do estado do Rio Grande do Sul e estabilizá-lo granulometricamente com agregado natural;
- Caracterizar mecanicamente o material fresado e a mistura estabilizada granulometricamente a partir do ensaio de Compactação e do Índice de Suporte Califórnia (ISC);
- Determinar a percentagem de cimento Portland utilizado na mistura de material fresado e agregado natural, através de ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS);
- Avaliar a RCS, a Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e o Módulo de Resiliência (MR) para as misturas contendo diferentes teores de CCA substituídos do cimento Portland e, com diferentes idades de cura úmida; para material fresado oriundo de apenas uma rodovia.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estabilização de solos

O solo natural é um material complexo e variável, mas devido sua disponibilidade universal e seu baixo custo, àquele disponível no local, ele oferece grandes variedades de utilização como um material de engenharia. Para que um solo específico seja adequado para utilização na construção, Ingles e Metcalf (1972) relatam que decisões fundamentais devem ser tomadas: Aceitar o material local como ele é, e projetar com padrões suficientes para que possa atender as restrições impostas por sua qualidade; Remover o material do local e substituir por um material de qualidade superior ou ainda alterar as propriedades do solo existente a fim de criar um material capaz de suportar as exigências para determinada utilização, a melhoria de solos.

Van Impe (1989) fala sobre a melhoria de solos como sendo a técnica mais antiga e também mais intrigante de todos os métodos de execução comuns em engenharia civil. A mais de 3000 anos atrás, a melhoria dos solos já era utilizada na construção de templos da Babilônia e pelos Chineses. Estes últimos utilizavam bambu, madeira ou palha para reforçar o solo. O ideograma chinês para o termo “engenharia civil” significa exatamente “solo e madeira”.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), desde os primórdios da construção de estradas, foi reconhecido que para transportar o tráfego, a superfície de uma estrada tem de ser mecanicamente estável, isto é, resistente às cargas que lhe são impostas. A estabilidade de uma estrada depende da resistência do material selecionado, adequadamente compactado e drenado. Os autores citam que a estabilidade mecânica também depende em sua grande maioria dos materiais utilizados, onde qualquer material bem compactado aumenta sua densidade, tornando-o mais resistente. A estabilidade também depende de disposição adequada de drenagem para impedir a penetração de água, sendo impossível superestimar a importância da drenagem e da compactação em qualquer construção com materiais térreos, onde a estrutura é necessária para o transporte de cargas.

Para Ingles e Metcalf (1972), a questão sobre a alteração das propriedades do solo para satisfazer as necessidades específicas da engenharia, é conhecida como estabilização de solos.

Vargas (1977) denomina como estabilização dos solos o processo pelo qual se confere ao solo maior resistência estável às cargas, à erosão ou ao desgaste, por meio de compactação, correção da sua granulometria e de sua plasticidade ou de adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão por cimentação ou aglutinação dos grãos.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), as propriedades de um solo podem ser alteradas de várias maneiras, entre as quais estão incluídos os tratamentos químicos, térmicos, mecânicos e de outros meios. Também deve ser reconhecido que a estabilização não é necessariamente uma solução 100% eficiente pela qual cada propriedade do solo é alterada para melhor. O uso correto exige reconhecimento de quais as propriedades do solo devem ser melhoradas, e esta exigência específica de engenharia é fator importante na decisão de estabilizar ou não.

A estabilização em pavimentos é direcionada, além do subleito, para as camadas sob o revestimento utilizado, como bases e sub-bases. Comentando um pouco sobre estas camadas, Yoder e Witczak (1975) definem uma camada de base como àquela que se encontra imediatamente abaixo da superfície de desgaste de um pavimento, e a sub-base é uma camada de material entre a base e o subleito (ou camadas inferiores). Camadas de base podem ser construídas de fragmentos de pedra, escórias, solo-agregados, materiais granulares tratados com cimento, entre outros. No caso de pavimentos asfálticos, a camada de base encontra-se perto da superfície, por conseguinte, tem de possuir elevada resistência de deformação, a fim de resistir às altas pressões que lhe são impostas. Sendo assim estas camadas podem ser executadas com algum tipo de estabilização para melhorar seu desempenho.

Van Impe (1989) denomina sua obra como "*state of the art*" (estado da arte) em técnicas de melhoria do solo, onde os seguintes grupos são distinguidos:

- Técnicas de melhoria de solo temporárias: limitada ao período de construção;
- Melhoramento do solo permanente: técnicas são aplicadas para melhorar o solo natural em si, sem a adição de materiais;

- Melhoria permanente do solo com a adição de materiais.

Yoder e Witczak (1975) comentam que como em quase todos os projetos de engenharia a economia é a principal questão, se justifica muito determinar os benefícios do processo de estabilização, sendo necessário que tenha em mente a finalidade do processo para que possa selecionar corretamente o tipo de estabilização a utilizar. Os autores ainda explanam em alguns casos onde podem necessitar de um processo de estabilização, como para melhorar subleitos e assim reduzir a espessura desejada do pavimento, também quando há limitações em materiais de base, como exemplo de alta plasticidade, estabilizando com cal ou cimento Portland para redução deste índice e estabilizações com substâncias químicas para controle de umidade, seja esta alta ou baixa.

Ingles e Metcalf (1972) comentam que as principais propriedades de um solo com as quais deve haver preocupações na construção são, a estabilidade de volume, resistências, permeabilidade e durabilidade. Embora os tratamentos de correção disponham para melhorar mais de um desses fatores ao mesmo tempo, é importante que os projetistas analisem cada um individualmente antes de englobá-los. E assim como já citado anteriormente, Ingles e Metcalf também citam que a estabilização deve ser considerada não só em termos de melhoria, mas também como uma medida preventiva contra situações adversas que possam ocorrer durante as execuções e durante toda vida da estrutura.

Mota e Bueno (2003) apresentam uma pesquisa (Figura 1) realizada junto à comunidade geotécnica brasileira acerca das técnicas de melhoria de solos conhecidas e aplicadas no território nacional. Constatou-se uma deficiência no conhecimento e uso de diversos métodos amplamente utilizados em outros países, demonstrando a necessidade na difusão de informações destas técnicas. Uma vez que algumas daquelas que não estão sendo utilizadas podem ter aplicação bastante promissora para os solos brasileiros.

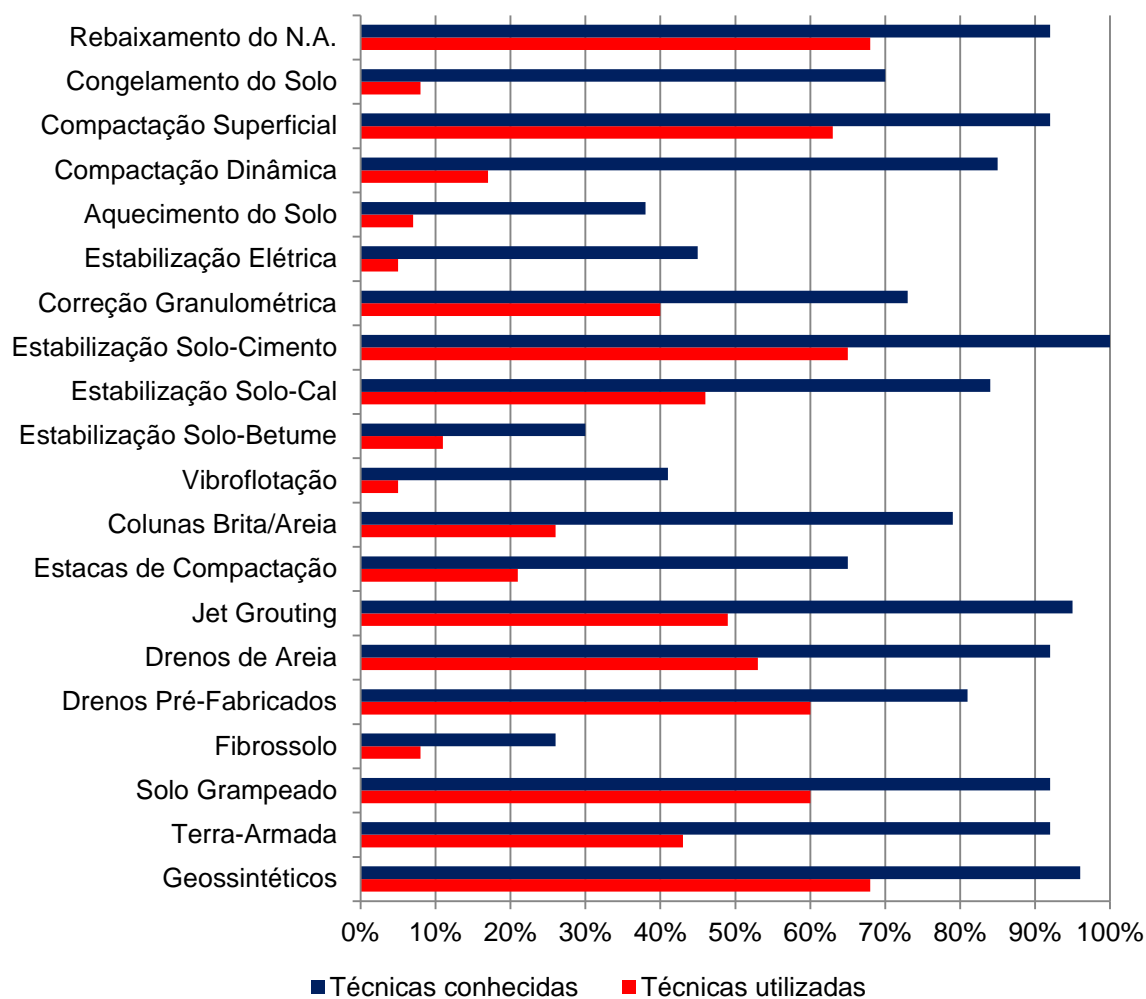


Figura 1 – Panorama do conhecimento e utilização de melhoria de solos no Brasil

Fonte: Adaptado de Mota e Bueno (2003).

2.1.1 Estabilização granulométrica

Segundo Vargas (1977), muitas vezes não é possível uma simples correção do material a ser utilizado, mesmo que se disponha de solos em que predominam pedregulhos, areias ou siltes e argilas. Então se vê necessário a composição artificial de solo estabilizado, usando a proporção adequada de cada um deles e sua mistura, a fim de obter granulometria final desejada.

Para Yoder e Witczak (1975), a estabilidade de uma mistura depende da forma e do tamanho das partículas, sua distribuição granulométrica, densidade relativa, fricção interna e da coesão. Um material granular concebido para a máxima estabilidade deve possuir fricção interna alta para resistir à deformação imposta pelas cargas. Destes fatores, a distribuição granulométrica e a proporção de finos para a fração de agregados graúdos é considerada a mais importante (Figura 2).

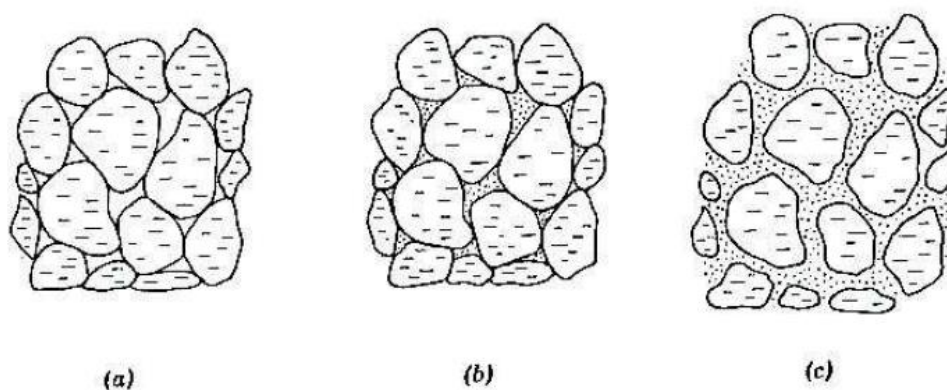


Figura 2 – Distribuição granulométrica e proporção de finos

Fonte: Yoder e Witczak (1975).

A seguir são explicadas as situações da figura 2, de acordo com os autores:

(a) Uma mistura de agregados que contém pouco ou nada de material fino e ganha a sua estabilidade a partir do contato grão-a-grão. Um agregado que não contém finos normalmente tem uma densidade relativamente baixa, mas é permeável e não suscetíveis às temperaturas baixas. Por não ser coesivo é de difícil manuseio para construção;

(b) Mistura que contém finos suficientes para preencher todos os espaços vazios entre os grãos, ganhando sua força pelo contato entre os grãos, mas com maior resistência ao cisalhamento. A sua densidade é alta e pouco menos permeável que (a). Seu manuseio é de moderada dificuldade, mas é ideal do ponto de vista da estabilidade.

(c) Esta contém uma grande quantidade de finos e não tem qualquer contato entre os grãos maiores, o agregado "flutua" no solo. A sua densidade é

baixa e a estabilidade é fortemente afetada na presença de água. O material é bastante fácil de manusear durante a construção e compacta-se facilmente.

Com essa apresentação de Yoder e Witczak torna-se evidente que a estabilidade de misturas é dependente da distribuição granulométrica, de forma que a demasiada ou nenhuma presença de finos prejudica o desempenho da mistura.

Silva (2012) estabilizou granulometricamente misturas de material fresado e agregados virgens para realização de ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia. As misturas adotadas de material fresado/pó-de-pedra foram de 30/70% e 70/30%, onde para o ISC foram adotados diversos pontos da curva de compactação, desta forma os resultados de ISC encontrados em laboratório foram de 56% a 70% (mistura 30/70%) e 34% a 45% (mistura 70/30%). Mostrando valores dentro dos mínimos aceitados pelas normas DNER-ES 301/97 e DNER-ES 303/97, que acerbam sobre sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente.

2.1.2 Estabilização química

Segundo Ingles e Metcalf (1972), quando um material ou uma combinação de materiais com estabilidade mecânica adequada não pode ser obtida, ou onde a resistência deve ser melhorada, pode ser aconselhável considerar a estabilização por meio da adição de estabilizantes químicos.

Yoder e Witczak (1975) citam alguns tipos de aditivos que podem ser utilizados para estabilização, como os agentes de cimentação, modificadores, impermeabilizantes, agentes de retenção de água e produtos químicos diversos. Os comportamentos de cada uma dessas misturas são bem diferentes, cada um tem o seu uso particular, e, inversamente, cada um tem suas próprias limitações.

Os principais materiais de cimentação que podem ser usados incluem o cimento Portland, cal, cinzas volantes e materiais betuminosos (INGLES E METCALF, 1972; YODER E WITCZAK, 1975). O cimento Portland é o agente cimentante utilizado em maior escala e com maior sucesso. Ele pode ser utilizado para camadas de base e de sub-bases de todos os tipos. Sua aplicação pode ser em solos granulares, solos siltosos e argilas, mas não pode ser utilizado em

materiais orgânicos, pois estes podem prejudicar a hidratação do cimento (YODER E WITCZAK, 1975).

Outro agente de cimentação citado por Yoder e Witczak (1975), a qual é muitas vezes utilizado, é a cal hidratada. A cal aumenta a força do solo, principalmente pela ação pozolânica. Este material é mais eficiente quando utilizado em materiais granulares e argilas, a quantidade necessária para uma boa hidratação é relativamente baixa. As cinzas volantes também citadas, geralmente possuem teores elevados de sílica e alumina, além de menores teores de ferro e cálcio, portanto, a adição de cal em solos para a utilização das cinzas volantes acelera a ação pozolânica.

Para Van Impe (1989), juntamente com compactações, a melhoria do solo pode ser intensificada por uma forte mistura de cimento ou cal. Se na estabilização com cimento, a mistura intensiva e a compactação do solo úmido com pó de cimento seco dá bons resultados especialmente em solos de menos coesão, em solos coesos como argila as vantagens podem ser obtidas por adição de cal durante a compactação da superfície. O princípio de melhoramento do solo usando reação química entre as partículas do solo, a água dos poros e os materiais adicionados é quase análoga, no caso destes materiais.

Segundo Dellabianca (2004), a incorporação de aditivos químicos como a cal, o cimento e a emulsão asfáltica, tem sido empregada na reciclagem de pavimentos flexíveis, desde meados da década de 40. Exemplos de revestimento e base reciclados com algum tipo de estabilizante químico podem ser encontrados em vários estados americanos tais como Arkansas, Califórnia, Flórida, Nevada e Pensilvânia, entre outros.

Ingles e Metcalf (1972) falam sobre a utilização de aditivos secundários para melhorar o efeito do cimento em diferentes solos, e que além do uso de cal, para auxiliar a pulverização, e do cloreto de cálcio, para neutralizar a matéria orgânica. As cinzas volantes também podem ser usadas com sucesso, sendo materiais sustentáveis para substituir parte do cimento Portland, agindo como pozolanas.

No Brasil, a reciclagem de base e sub-base com estabilizantes químicos vem ganhando bastante espaço ultimamente. Porém, observa-se ainda certa carência quanto a estudos relacionados ao comportamento dessas misturas recicladas, uma vez que os solos brasileiros e as condições climáticas apresentam peculiaridades que devem ser consideradas.

2.1.2.1 Estabilização química com cimento

Vargas (1977) conceitua solo-cimento como o produto de uma mistura compactada de solo com cimento e água, produzindo assim um novo material, com uma alta resistência, baixa deformabilidade, durabilidade a fatores agressores como a água, aos efeitos térmicos, e as baixas temperaturas, sendo assim, muito aplicada em obras de engenharia civil.

Ingles e Metcalf (1972) já citavam em sua obra que a estabilização química com cimento já tinha ampla utilização na construção de estradas naquela época. A técnica de utilização do cimento envolve, geralmente, o espalhamento do cimento sobre a superfície do solo, mistura e posterior compactação na devida umidade. Os autores comentam que a adição mesmo em pequenas quantidade, até 2%, modificam as propriedades do solo, enquanto que grandes quantidades, entre 5 e 10%, modificam radicalmente as propriedades, e, dependendo da mistura, alguns consideram um determinado tipo de “concreto magro”.

Para Yoder e Witczak (1975) a estabilização de solo com cimento consiste na adição do cimento Portland com um determinado tipo de solo, permitindo que a mistura endureça pela hidratação do cimento. Os fatores que afetam as propriedades físicas da mistura incluem o tipo de solo, a quantidade de cimento, o grau da mistura, o tempo de cura e a densidade seca da mistura compactada. Os autores salientam a questão do tempo de cura da mistura, sendo essencial a cura na presença de água, antes da abertura do tráfego. Para época, foi citada a ampla utilização da mistura de solo-cimento para restauração de estradas, onde o cascalho era escarificado, estabilizado com cimento, e então compactado. Este tipo de estabilização, sempre foi de grande utilização nos Estados Unidos para bases e subbases em estradas secundárias, e ainda citam ser muito difícil encontrar resultados de RCS entre 6,5 e 13,5 MPa.

Yoder e Witczak (1975) citam que a quantidade de cimento requerida para estabilizar um material granular depende da quantidade e qualidade dos finos contidos, bem como a densidade final da mistura compactada. Os valores típicos variam entre 2 e 6% em peso do material final compactado.

Segundo Guyer et al. (2011), a estabilização com cimento Portland pode ser usada tanto para modificar e melhorar a qualidade do solo, ou para transformar o

solo em uma massa cimentada com maior resistência e durabilidade. A quantidade de cimento usado dependerá do fato de que o solo é para ser modificado ou estabilizado.

De acordo com o Instituto Americano de Concreto, *American Concrete Institute* (1997), desde 1915, quando uma Rua em Sarasota na Flórida foi construída utilizando uma mistura de conchas, areia e cimento Portland misturados com um arado e compactado, o solo-cimento tornou-se uma das formas mais usadas de estabilização de solos para rodovias. Mais de 100.000 quilômetros de pavimento com 7,2 m de largura utilizando solo-cimento haviam sido construídos até 1997.

Silva e Miranda Junior (2000) realizaram no estado de Minas Gerais, obras de recuperação da BR-381 com reciclagem de camada betuminosa estabilizada com cimento como alternativa de sub-base. Na ocasião foi utilizada uma percentagem de 4,2% de cimento incorporado ao material fresado da capa asfáltica. Este valor foi obtido com base em resultados de ensaios de compressão simples, realizados na mistura, para diferentes variações de teor de cimento. Na realização dos ensaios de RCS trabalhou-se com corpos de prova cujas dimensões apresentavam altura de 17,8 cm e diâmetro de 15,2 cm. O tempo de cura adotado foi de seis dias, em câmara úmida. Nos resultados encontrados foram verificados ganhos consideráveis de resistência em função da adição do cimento, conforme o aumento do teor.

Taha et al. (2002), realizaram uma avaliação laboratorial de material fresado e agregados virgens estabilizados com cimento. Os experimentos foram feitos para diferentes misturas de fresado/agregado virgem: 100/0; 90/10; 80/20; 70/30 e 0/100%. As amostras preparadas utilizando 0, 3, 5, e 7% de cimento Portland CP-I, curados durante 3, 7 e 28 dias para ensaios RCS e MR. Os resultados apresentados mostram que o fresado puro (100%) não é recomendado para utilização como um material de base, a menos que estabilizado com cimento, e as misturas de fresado/agregados virgens estabilizados com cimento se mostram ser uma boa alternativa de utilização na construção de bases rodoviárias.

De acordo com Dellabianca (2004), as propriedades mecânicas das misturas compactadas de solo e cimento devem ser consideradas, pois a importância da compactação está ligada não apenas ao grau de compactação, mas também ao tempo, uma vez que se realizada após a hidratação do cimento apresenta resultados ineficientes. O tempo de cura influencia positivamente no ganho dessa resistência, o que interfere até mesmo no tipo de cimento utilizado na mistura.

2.1.2.2 Estabilização química com cinza de casca de arroz

Atualmente existem poucos trabalhos sobre a utilização da CCA como aditivo para estabilização de camadas de pavimentos. A CCA, segundo a maioria dos pesquisadores, deve ser utilizada como aditivo a outro material já adicionado para estabilização ou melhoria da mistura em estudo, para que ocorram as reações pozolânicas necessárias. Os materiais mais utilizados são o cimento portland e a cal. Por ser um produto muito utilizado na construção civil, as pesquisas em concreto de cimento portland com adição de CCA já estão em estágio bem avançado em relação aquelas de aplicação em camadas de base e subbases para pavimentos flexíveis.

Segundo Behak (2007), a partir dos anos 80 e 90, foi desenvolvido um maior número de pesquisas relacionadas com a estabilização de solos com CCA e cal ou cimento. Rahman (1986, apud Behak, 2007) que estabilizou solos lateríticos na Nigéria, recomendando um teor de 18% de CCA para materiais a serem utilizados como camadas de sub-base. A particularidade da pesquisa de Rahman (1986) foi que misturou os solos lateríticos só com CCA, ou seja, sem nenhum outro aditivo.

Ali et al. (1992) pesquisaram os efeitos da estabilização de solos da Malásia por adição de CCA com cal ou cimento. Concluíram que nos países tropicais, onde a casca de arroz é abundante e considerada como resíduo, o uso de CCA em obras de pavimentação é particularmente atrativo, porque ajudariam a reduzir custos construtivos e de deposição, bem como danos ambientais, preservando, ainda, os materiais de maior qualidade para usos prioritários.

Alhassan (2008) realizou ensaios com amostras de solos da área de Maikunkele Minna, Nigéria, onde estas foram estabilizadas 2-12% de casca de arroz (CCA), em peso, de solo seco. O desempenho do solo-CCA foi investigado com relação às características de compactação, ISC e RCS. Os resultados obtidos indicaram uma diminuição geral na densidade máxima seca e aumento do teor de umidade ótimo, com aumento do teor de CCA. Também houve ligeira melhora no ISC e RCS com aumento do teor de CCA. Os valores máximos de RCS foram registrados a CCA entre 6-8%.

Prietto et al. (2010), realizaram estudos para a melhoria de estradas de baixo volume de tráfego. Foi feita a investigação do potencial de utilização de solos

estabilizados como camadas de base em estradas vicinais. Utilizaram seis solos residuais, das regiões de Pelotas e Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul, onde foram selecionados e estabilizados com cimento, cal e CCA. Ensaio de RCS, RTCD e MR foram realizados para avaliar a melhoria destes solos. Os resultados apresentados mostram o potencial de utilização como alternativa técnica às soluções convencionais de pavimentação de estradas de baixo volume de tráfego.

De acordo com Edeh, Onche e Osinubi (2012), o uso de material fresado e da CCA na construção de pavimentos tem benefícios não só em reduzir a quantidade de resíduos que necessitam de eliminação, mas também de proporcionar um novo material para construção de economia significativa. Os autores apresentam resultados de uma avaliação laboratorial das características do material fresado estabilizado com CCA, com vista a determinar sua adequação para utilização como material de base e sub-base em pavimentos flexíveis. As misturas de fresado-CCA com e sem cimento foram submetidas a ensaio de Proctor normal e ISC, e os resultados dos testes mostraram uma melhora nas propriedades do fresado quando tratado com CCA e cimento Portland. As misturas com 89% fresado + 9% CCA + 2% cimento e 89,25% fresado + 9,25% CCA + 1,5% cimento, apresentaram valores de ISC de 79% e 72%, estes que podem ser aplicados para camadas de sub-bases e bases, porém para esta última apenas às rodovias de baixo volume de tráfego.

Schendel et al. (2012), realizaram misturas de solo-cimento-CCA para avaliar seu comportamento pela necessidade de uso de novos materiais alternativos em obras de pavimentação. Os resultados encontrados para ensaios de ISC mostraram que as adições de CCA alteraram o comportamento da adição de cimento, não aumentando o ISC, mas melhorando seu comportamento, fazendo a mistura trabalhar mais linearmente sem perdas bruscas de resistência.

2.2 Reciclagem de pavimentos

Para Bernucci et al. (2008) reciclagem de pavimentos é o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, CAP

ou EAP novos, quando necessários, e também com adição de aglomerantes hidráulicos.

Segundo publicação da *Federal Highway Administration - FHWA* (1996), a reutilização ou reciclagem da estrutura de um pavimento deteriorado não é nada novo. As primeiras formas de reciclagem de pavimentos foram datadas em meados de 1915 nos Estados Unidos. No entanto, a reciclagem de pavimentos asfálticos em sua forma atual ocorreu pela primeira vez em meados dos anos 1970, quando o interesse na reciclagem foi provocado pela inflação dos preços de construção e pelo embargo do petróleo pela *Organization of the Petroleum Exporting Countries – OPEC*.

Em resposta a essas pressões econômicas, a FHWA iniciou o Projeto de Demonstração 39 – Reciclagem de Pavimentos Asfálticos (*Demonstration Project 39 – Asphalt Recycling Pavements*), em Junho de 1976.

O DP 39, como foi chamado, mostrava que a reciclagem de pavimentos asfálticos era uma técnica de reabilitação tecnicamente viável, e estimava que o uso do *Recycled/Reclaimed Asphalt Pavement – RAP* (como é chamado o material fresado internacionalmente) equivaleria a aproximadamente 15% da produção total de misturas asfálticas à quente, nos anos 1980. Com isso, esperava-se que a maior parte dos materiais asfálticos removidos seriam reutilizados na construção de novos pavimentos.

De acordo com Brosseaud (2011), atualmente os materiais mais reciclados nos Estados Unidos são as misturas asfálticas, com mais de 80 milhões toneladas por ano. Isso representa aproximadamente duas vezes mais que os quatro resíduos notadamente mais reciclados, que são papéis, vidros, plásticos e alumínio, onde juntos somam 40 milhões de toneladas recicladas por ano.

Na Europa, a situação é variável, como indicado na tabela 1. Na Alemanha e na Holanda, os princípios de reciclagem são considerados como um modo de vida a 20 anos, diferentemente dos países do sul da Europa (Itália, Espanha, Grécia etc.), que são muito menos preocupados com estas questões.

Tabela 1 – Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) na Europa

| CBUQ | Alemanha | França | Itália | Holanda | Outros | Total |
|-------------------------------|----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| | | 55 | 40 | 35 | 10 | 180 |
| Fresado disponível | 14 | 7 | 12 | 5 | 12 | 50 |
| Fresado utilizado em CBUQ | 11 | 3 | 2 | 3 | 2 | 25 |
| Taxa de fresado utilizado (%) | 80 | 42 | 17 | 70 | 17 | 50 |

Fonte: Adaptado de EAPA, 2010 apud Brosseaud, 2011.

Brosseaud (2011) cita ainda o caso da França especificamente, onde pesquisas realizadas em 2007 e 2010 mostraram que houve um aumento significativo da proporção de misturas asfálticas antigas recuperadas e recicladas que foram empregadas em novas misturas a quente, passando de 23 para 42% em apenas três anos. Isso reflete a vontade de todos os envolvidos no âmbito rodoviário que se engajaram voluntariamente na reciclagem.

No Brasil, a reciclagem foi empregada pela primeira vez em 1960 pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, onde o material asfáltico era removido das vias urbanas com marteletes e transportado até usinas para serem misturados novamente (CASTRO, 2003).

Em 1980 teve-se o incentivo do DNER no processo de reciclagem “in situ”, o qual consistia da utilização de equipamentos que fresavam o revestimento, processavam a mistura do material fresado e promoviam o seu espalhamento no local, por dois métodos (DNER, 1998):

- Método Marine: Empregava a planta móvel recicladora Marine A.R.T. 220, de fabricação italiana, onde a fresagem era realizada a frio. Essa técnica foi utilizada para a restauração de cerca de 80 km da rodovia Presidente Dutra no estado do Rio de Janeiro.
- Método Wirtgen: Utilizava a planta móvel "remixer" da Wirtgen, onde a fresagem era realizada após o aquecimento da superfície do revestimento. A técnica foi adotada pelo DNER na Rodovia Presidente Dutra, em 1986, em cerca de 140 km da rodovia nas proximidades de Taubaté.

A primeira experiência brasileira de reciclagem de uma rodovia, após incentivos do DNER em 1980, ocorreu em 1985, em um trecho de 100 km da Rodovia Anhanguera, entre São Paulo e Campinas. Os autores citam que neste caso foi executada a fresagem do revestimento e posterior reciclagem em usina drum mixer (CAMPOS, 1987; MELLO; CAMERATO, 1995, apud DAVID, 2006).

Na década de 90, de acordo com Bonfim e Domingues (1995), foi realizada a primeira obra de reciclagem *in situ* a frio em área urbana no país, em um segmento comercial da Via Anchieta, São Paulo.

Já segundo Pinto et al. (1995 apud David, 2006), a reciclagem a frio *in situ* foi realizada pela primeira vez no Brasil pelo DNER em 1993, na BR-393, Rio de Janeiro, com a utilização de emulsão especial.

Em 2004, foi executado um trecho experimental na rodovia SP-147, entre Piracicaba e Limeira. Devido ao sucesso obtido, esta tecnologia foi escolhida para a restauração de 35 km desta rodovia. O projeto incluiu, entre outros, a avaliação da viabilidade de aplicação do sistema, projeto de mistura, testes de desempenho em amostras preparadas no laboratório e uma emulsão especialmente formulada para garantir coesão, rigidez inicial e elevada durabilidade. (LIBERATORI; CONSTANTINO; TUCHUMANTEL, 2005).

Sachet e Gonçalves (2008) apresentam uma proposta de trabalho sobre o controle tecnológico de reciclagem de pavimentos a frio *in situ* de bases granulares. Aplicados em trechos rodoviários de monitoramento no Estado do Rio Grande do Sul no ano de 2006, destacando para a verificação do ISC *in situ* através do uso do *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). Os resultados obtidos mostraram-se positivos para verificação da capacidade de suporte de bases granulares recicladas e para apontamentos de heterogeneidades construtivas localizadas.

Oliveira, Baran e Schmidt (2010), apresentam uma análise de projeto efetuada onde foi adotada a reciclagem profunda de pavimentos como solução de restauração para alguns segmentos da BR-282, entre os municípios de Florianópolis e Lages em Santa Catarina, totalizando aproximadamente 215 km. Para 76 km, onde a situação era mais crítica, foi constatado que a reciclagem profunda com correção granulométrica e adição de cimento era a alternativa mais adequada. Os autores também citam acerca da economia da reciclagem ser realmente evidente e ter desempenho satisfatório.

Os trabalhos de Trichês, Lorena e Santos (2010) e Trichês e Santos (2013) mostram a avaliação do desempenho da reciclagem com a adição de cimento empregada na restauração da rodovia SC-303 (SC-150), trecho BR-282 entre os municípios de Joaçaba e Capinzal, Santa Catarina. O trecho de 30 km apresentava comprometimento total do revestimento e a reciclagem foi executada entre os anos de 2006 e 2007. A reciclagem contemplou em 15% de adição de agregados virgens, adição de 3% em peso de cimento, trituração de 8 cm de revestimento e 12 cm da camada de base, tratamento superficial simples e execução de revestimento em asfalto-borracha com 4 cm de espessura. Os resultados de monitoramentos durante os anos mostram que a reciclagem propiciou uma redução significativa na deflexão do pavimento existente e a homogeneização de sua capacidade estrutural. Os valores dos módulos retro analisados da camada de base foram considerados baixos pelos autores. Após 5 anos de abertura ao tráfego, 11,3% do revestimento precisa ser recuperado, valor considerado elevado pelos autores, indicando que a rodovia não atenderá ao período de projeto pelo critério de porcentagem de área trincada. Todavia salientam que o baixo nível das trilhas de roda é indicativo que a camada reciclada não estaria trincada.

Pinto, Cervo e Pereira (2012), apresentam uma forma de reutilização do material fresado em acostamentos de rodovias, como agente regulador e nivelador. O estudo realizado utilizou o material sem alterações ou adições de insumos, onde da mesma forma possibilitava o reaproveitamento, além de destinar um local adequado para o resíduo e reduzir custos na manutenção de rodovias. O material analisado apresentou Abrasão Los Angeles de 36,67% e ISC de 38%. Os resultados obtidos indicam que o agregado fresado não é propício para usar em base de pavimentos na faixa de rolamento, porém apresenta resultados bastante satisfatórios para reutilização nos acostamentos que recebe solicitações bem inferiores, devendo assim ponderar os locais de emprego e sua função estrutural.

Paiva e Oliveira (2014) desenvolveram uma investigação de laboratório usando duas amostras de fresado, uma com ligante convencional e outra com asfalto borracha para avaliar a resistência à fadiga destes materiais reciclados estabilizados com 3% em peso de cimento. Os materiais testados sofreram influência do percentual de asfalto fresado e do nível de atividade do CAP na resistência à fadiga. Os autores finalizam que materiais reciclados do pavimento com percentuais de fresado de borracha acima de 30% em peso são prejudiciais ao

comportamento da camada reciclada. De igual modo se deve fazer o mesmo para pavimentos com características similares ao fresado de ligante convencional, cujo percentual máximo de asfalto fresado seria de 50% em peso.

Bessa et al. (2014) apresentam um trabalho voltado à técnica de reciclagem à frio na reutilização do material fresado. Foi adotada compactação Marshall para confecção das amostras, utilizando 2, 3 e 4% de emulsão asfáltica, ainda acrescidos 3% de água e 1% de cimento. Os autores realizaram ensaio de MR e RT, verificaram também a resistência ao dano por umidade induzida das amostras com teores variáveis de emulsão. Os resultados apresentados mostram que o aumento no teor de emulsão levou a uma pequena queda nos valores de MR e a um aumento nos valores de RT. O ensaio de dano por umidade revela maiores perdas em suas propriedades nas amostras com maior teor de emulsão asfáltica. Ainda é concluído que a variação do tipo e do teor dos ligantes hidráulicos não apresentou variações significativas nos resultados mecânicos.

2.2.1 Conceitos

De acordo com a Associação de Reabilitação e Reciclagem de Pavimentos Asfálticos dos Estados Unidos (*The Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA*), a reciclagem dos materiais de um pavimento já existente para produzir novos materiais de pavimentação, resulta em considerável economia de recursos, dinheiro e energia. Ao mesmo tempo auxilia na solução de problemas de disposição do que seriam os entulhos decorrentes de processos de restauração. Além disso, devido à reutilização dos materiais existentes, a geometria e espessura originais do pavimento podem ser mantidas durante o processo construtivo.

Segundo a ARRA (1997), o reaproveitamento dos materiais do pavimento para produzir um novo pavimento resulta em uma redução considerável de materiais, custo e energia. Ao mesmo tempo, a reciclagem do pavimento deteriorado também contribui para solucionar problemas de disposição do material na pista, pois o reuso do material permite manter a geometria e a espessura do pavimento. Em alguns casos, a interrupção do tráfego é menor do que em outras técnicas de reabilitação. Assim, a técnica de reciclagem tem como vantagens específicas:

- Redução de custos da construção;
- Aproveitamento de agregados e ligantes;
- Preservação da geometria existente;
- Preservação do meio ambiente;
- Economia de energia nas etapas de produção, transporte e extração da matéria prima;
- Menor tempo de execução.

No Brasil, o Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006) aborda a reciclagem como uma boa forma de solução para diversos problemas de pavimentação e expõe as técnicas de aplicação de acordo com alguns critérios estabelecidos pré-projeto, são eles:

- Observação dos defeitos do pavimento;
- Determinação das causas prováveis dos defeitos, baseado em estudos laboratoriais e de campo;
- Informações de projeto e histórico das intervenções de conservação;
- Custos;
- Histórico do desempenho do pavimento;
- Restrições quanto à geometria da rodovia (horizontal e vertical)
- Fatores ambientais;
- Tráfego.

A figura 3, adaptada de Bonfim (2011), apresenta uma classificação bem definida dos tipos de reciclagem. A presente revisão foi baseada na classificação de técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos estabelecida pela ARRA (1997). Esta classificação designa as técnicas de acordo com a temperatura com que se dá a mistura (“a quente” ou “a frio”) e também, com o local em que ela é preparada (“em usina” ou “*in situ*”). Além disso, considera também a profundidade do pavimento existente que sofrerá a intervenção.

| | | |
|--------------------------------------|------------------------|--|
| Quanto à geometria original | Sem modificação | Quando se mantém as cotas do greide |
| | Com modificação | Quando não se mantém as cotas do greide |
| Quanto ao local de processamento | Em usina | Fixa ou móvel, quente ou frio |
| | <i>In situ</i> | <i>In situ</i> da reciclagem da base e aplicação de reciclagem a quente processada em usina com material fresado |
| | Mista | |
| Quanto à fresagem do material | A frio | Realizada na temperatura ambiente |
| | A quente | Realizada com pré-aquecimento do pavimento |
| Quanto à profundidade de corte | Superficial | Somente da camada de revestimento |
| | Profunda | Camada de revestimento, base e até sub-base |
| Quanto à origem da mistura reciclada | Mistura a frio | PMF |
| | Mistura a quente | CBUQ, PMQ |
| Quanto ao uso da mistura | Como base reciclada | |
| | Como camada de ligação | |
| | Como revestimento | |
| Quanto aos materiais adicionados | Agregados | Correção granulométrica |
| | Cimento Portland e Cal | Aumento da capacidade estrutural |
| | Emulsão especial e CAP | Rejuvenescimento |
| | Misturas asfálticas | Adição de material fresado |

Figura 3 – Quadro de classificação dos processos de reciclagem de pavimentos

Fonte: Adaptado de BONFIM, 2011.

Abaixo estão às quatro técnicas determinadas na classificação que serão explanadas no decorrer deste trabalho:

- Reciclagem a Frio *in situ* (*cold in-place recycling*);
- *Full Depth Reclamation*;
- Reciclagem a quente em usina (*hot recycling*);
- Reciclagem a quente *in situ* (*hot in-place recycling*).

Antes de expor sobre cada técnica de reciclagem, é importante entender o processo de fresagem. Este que também é chamado de “*cold planning*”, é um procedimento realizado antes da reciclagem onde o material asfáltico é removido da rodovia para posterior usinagem de nova mistura.

2.3 Fresagem de pavimentos (cold planing)

Segundo ARRA (1997), o ingresso dos processos de fresagem revolucionou a reciclagem de pavimentos asfálticos. A fresagem possibilita a reobtenção dos agregados em forma granular, mesmo que envoltos por ligante envelhecido e em função do desgaste da camada, com sua granulometria alterada.

A fresagem para restauração de pavimentos originou equipamentos e processos específicos: “*cold milling machine*”, que efetua o desgaste da estrutura por meio simples abrasivo e rotação intensa, e processo a quente, que utiliza o pré-aquecimento da estrutura para facilitar o corte. Assim, a fresagem do pavimento pode ser realizada de duas maneiras quanto à temperatura, a frio ou a quente. (BONFIM, 2011)

A fresagem a frio é definida como um método de remoção de pavimentos automaticamente controlada de acordo com a profundidade desejada, com equipamentos especialmente projetados e desenvolvidos. Também pode ser alcançada uma restauração da superfície para um especificado grau e inclinação, livre de inchaços, trilhas de roda e outras imperfeições (ARRA, 1997).

Com base no exposto, com maior abrangência, pode-se conceituar a fresagem de pavimentos como sendo o corte ou desgaste de uma ou mais camadas de pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, empregado como intervenção visando restauração de pavimentos (BONFIM, 2011, p. 20).

2.3.1 Métodos aplicativos

A fresagem constitui o princípio do processo de reciclagem de um pavimento, promovendo sua desintegração e ocasionando a formação do *reclaiming asphalt material*, material de asfalto reciclado, termo normalmente aplicado para designar o material fresado de revestimentos asfálticos.

Bonfim (2011), afirma que de maneira resumida, os processos de fresagem podem ser classificados quanto à espessura do corte e à rugosidade resultante na pista. Quanto à espessura de corte há três tipos de fresagem, são elas: fresagem

superficial; fresagem rasa e fresagem profunda. São três, também, os tipos de fresagem determinados quando o parâmetro analisado é a rugosidade resultante na pista, sendo: fresagem padrão; fresagem fina e microfresagem.

- **Fresagem: Quanto à espessura do corte**

Fresagem Superficial: Conhecida como fresagem de regularização, é destinada apenas a correção de defeitos existentes na superfície do pavimento. Sendo assim, pode ser dispensado o posterior recapeamento da pista, uma vez que a textura obtida permite o rolamento de forma segura, porém não muito confortável, executando-se em pontos específicos onde a desagregação do revestimento remanescente acarrete a formação de buracos. (BONFIM, 2011)

Fresagem Rasa: A fresagem rasa atinge normalmente as camadas superiores do pavimento, chegando em alguns casos na camada de ligação. Na maioria dos serviços é aplicada a uma profundidade média de corte em torno de 5 cm.

Esse procedimento é utilizado na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais. É aplicado, principalmente, em vias urbanas, onde se deseja manter o greide do pavimento com relação aos dispositivos de drenagem superficial e obras de arte correntes. (BONFIM, 2011, p. 22).

Fresagem Profunda: A fresagem profunda é aquela cujo corte atinge níveis consideráveis, podendo atingir as camadas de ligação, de base e até de sub-base do pavimento.

Esse é um procedimento geralmente utilizado em intervenções de reabilitação estrutural, seja por recomposição da estrutura do pavimento ou mesmo, por reciclagem e incorporação do revestimento à base. Visando a segurança e o restabelecimento das condições ideais de atuação dos dispositivos de drenagem superficial, esta técnica é utilizada para corrigir o greide original das rodovias (BONFIM, 2011, p.22).

- **Fresagem: Quanto à rugosidade resultante na pista**

Fresagem Padrão: A fresagem padrão (*standard*) resulta do cilindro originalmente oferecido nos equipamentos. A distância lateral entre os dentes do corte é de aproximadamente 15 mm. A fresagem padrão deve ser seguida da

aplicação de uma nova camada de revestimento, devido à rugosidade elevada resultante. (BONFIM, 2011).

Fresagem Fina: Este tipo de fresagem, conhecida como “*fine milling*”, é possibilitada por um menor espaçamento entre os dentes do tambor, aproximadamente 8 mm, resultando sulcos menores e menor rugosidade na pista. (BONFIM, 2011).

“Essa técnica é muito utilizada na regularização das vias, por possibilitar melhores condições de trafegabilidade aos usuários. Em alguns casos, neste tipo de aplicação, pode-se dispensar o posterior recapeamento da pista” (BONFIM, 2011).

Microfresagem: A microfresagem (“*micro milling*”) é resultante de fresagem com cilindro dotado de dentes espaçados lateralmente em aproximadamente 2 a 3 mm.

“Consiste na remoção de uma camada muito delgada do revestimento, visando a adequação do perfil longitudinal ou retirada de faixas de sinalização horizontal das pistas, para alteração do layout viário” (BONFIM, 2011).

Ainda segundo Bonfim (2011), os cilindros de microfresagem eram inicialmente disponibilizados apenas para equipamentos de pequeno porte, e os dentes de corte eram de menores dimensões se comparados com os dentes utilizados em outros tipos de fresagem. Importante destacar que neste tipo de fresagem é dispensável a aplicação de uma nova camada de revestimentos.

2.3.2 Equipamentos

Para que a fresagem, presente nos processos de reciclagem seja executada com precisão e eficiência, com desempenho satisfatório do pavimento reciclado resultante, o guia de especificações da ARRA (1997) para máquinas fresadoras, determina que estas devam ter alto poder de operação, ser autossuficientes em tração, potência e estabilidade para remover o pavimento até a profundidade especificada.

Especifica-se também que uma fresadora deve ter um sistema automático para controle de elevação e grau de inclinação transversal, para poder executar corretamente a superelevação existente em curvas do traçado. A máquina deve ser

equipada com um meio de controlar eficazmente a poeira gerada pela operação de corte. De acordo com a ARRA (1997), há cinco classes de fresadoras.

- Classe I – consiste em triturar o pavimento na medida necessária para remover irregularidades na superfície;
- Classe II – consiste em triturar a superfície até uma profundidade uniforme;
- Classe III – consiste em triturar a superfície até uma profundidade, dando a ela uma inclinação transversal e/ou disposições especiais;
- Classe IV – consiste na fresagem de toda profundidade do pavimento existente, a partir do sub-leito ou da base subjacente;
- Classe V – consiste na moagem/fresagem a uma profundidade variável do pavimento existente e/ou disposições especiais.

Os equipamentos possuem alguns componentes importantes, como o cilindro fresador e os dentes de corte. O cilindro fresador é um tambor rígido construído em aço especial, no qual os dentes de corte são fixados. Também é conhecido como rolo fresador ou tambor fresador. O sistema de corte do equipamento é basicamente o mesmo para todos os modelos. O cilindro gira em alta rotação e, quando colocado para cortar, inicia o desbaste da espessura desejada no pavimento.

Os dentes de corte são as pontas de ataque que agem diretamente no pavimento, responsáveis pelo desbaste. São peças constituídas por corpo forjado em aço, com ponta de material mais duro, de carboneto de tungstênio e cobalto.

A ARRA (1997) recomenda que a superfície resultante de operações de fresagem a frio devem possuir uniformidade, estrias longitudinais descontínuas ou outro padrão uniforme. As figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, uma máquina fresadora e uma superfície resultante de fresagem.

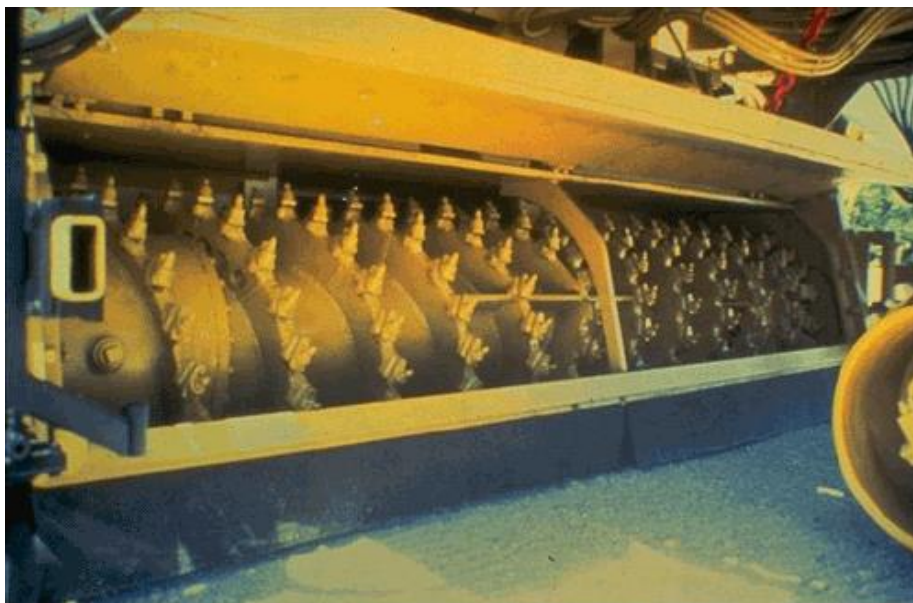


Figura 4 – Vista do cilindro fresador de uma máquina fresadora

Fonte: ARRA (1997).



Figura 5 – Superfície resultante de fresagem a frio

Fonte: ARRA (1997).

Bonfim (2011) em sua obra divide os equipamentos de fresagem quanto ao seu tamanho. São três as classes determinadas: Equipamentos de fresagem de pequeno, médio e grande porte.

- **Equipamentos de Pequeno Porte:**

De acordo com Bonfim (2011), os equipamentos de pequeno porte (Figura 6) são destinados à fresagem de arremates junto às diversas interferências existentes nos pavimentos, onde anteriormente havia uma grande dificuldade em realizar esses serviços específicos. São utilizados principalmente para execução de pequenas intervenções como remendos, acabamentos ao redor de tampões de ferro, junto à sarjetões, entre outros. Por terem um tamanho menor, são mais versáteis, facilitando os serviços em vias urbanas.



Figura 6 – Fresadora W 35 DC da Wirtgen

Fonte: Wirtgen, 2012.

- **Equipamentos de Médio Porte:**

Os equipamentos de médio porte (Figura 7) são destinados à execução de fresagem de pequenas e de grandes áreas. Se a frente de serviço oferece boas condições, sem muitas interrupções e quando utilizado em ruas estreitas, apresentam boa versatilidade nas manobras. Possuem correia transportadora para carregamento do material fresado em caminhões basculantes simultaneamente à execução da fresagem (BONFIM, 2011).



Figura 7 – Fresadora W 1000 da Wirtgen

Fonte: Wirtgen, 2012.

- **Equipamentos de Grande Porte:**

Os equipamentos de grande porte (Figura 8) são destinados a fresagem de grandes áreas, por possuírem cilindros fresadores maiores que os equipamentos de médio e pequeno porte. São indicados para locais que oferecem perfeitas condições de trabalho, sem muita interferência, como ruas largas, grandes avenidas e principalmente rodovias. Por seu grande tamanho, deve-se evitar realização de

manobras, o que seria prejudicial para a produtividade e pelos problemas que pode causar ao trânsito local (BONFIM, 2011).



Figura 8 – Fresadora W 1900 da Wirtgen

Fonte: Wirtgen, 2012.

2.4 Técnicas utilizadas na reciclagem de pavimentos à frio

Reciclagem a frio é o procedimento aplicado para recuperar e reutilizar o material de um pavimento existente, sem a utilização do calor como artifício para realização do trabalho. O campo da reciclagem a frio abrange alguns tipos de aplicações, como para camadas relativamente finas, constituídas principalmente de material asfáltico (reciclagem a frio *in situ*), ou para camadas espessas, que incorporam além da camada asfáltica, a camada granular do pavimento, método conhecido como “*full depth reclamation*” (WIRTGEN, 2012).

A reciclagem a frio *in situ*, diferentemente das técnicas de reciclagem a quente, possui atualmente uma importância significativa no cenário nacional, sendo aplicada em maior escala. No âmbito sócio-econômico, a técnica se enquadra como

uma maneira racional para resolver problemas de pavimentação de diversas naturezas com eficiência e gastos minimizados de energia, principalmente no caso *in situ*, em que não há necessidade de transporte até usinas estacionárias, economizando energia proveniente dos combustíveis. Não existe também o processo de aquecimento de materiais, o que resulta em economia de recursos e de capital aplicados.

De acordo com a ARRA (1997), entre os métodos de reciclagem a frio, destacam-se a reciclagem a frio *in situ*, que pode ser efetuada de duas formas: com profundidade total (*full depth*), ou profundidade parcial do revestimento asfáltico. A figura 9 de Rogge et al. (1993 apud David 2006) traz recomendações da utilização destes processo de reciclagem.

| Não se recomenda quando houver: |
|---|
| Problemas de subleito |
| Incompatibilidade ao volume de tráfego |
| Falta de adesividade |
| Excesso de ligante |
| Condições severas de frio e umidade |
| Espessuras de revestimento inferiores a 4 cm |
| Recomenda-se quando houver: |
| Trincamento |
| Incompatibilidade ao volume de tráfego |
| Irregularidade superficial |
| Necessidade de camada de binder ou base no caso de recapeamento |
| Necessidade de reabilitação seletiva por faixa de rolamento |
| Falta de agregados virgens na região |

Figura 9 – Critérios de seleção do processo de reciclagem a frio *in situ*

Fonte: ROGGE et al., 1993 apud DAVID, 2006.

A PCA – Portland Cement Association (2013) relata sobre a reciclagem profunda com incorporação de cimento. Sendo uma técnica que recicla o material do pavimento asfáltico criando uma nova base estabilizada que será mais rígida, uniforme e resistente à umidade se comparada à base original, resultando em uma camada com maior durabilidade e com menores esforços de manutenção.

A PCA (2013) aponta que os custos deste tipo de reciclagem são normalmente de 25 a 50% menores do que a alternativa convencional de restauração que contemplam serviços de fresagem e recomposição do revestimento existente e posterior aplicação de camadas de reforço em concreto asfáltico. A figura 10 mostra um comparativo entre o uso de energia e materiais entre a alternativa da implantação de nova base e de base reciclada. Como citado anteriormente, existem cinco técnicas determinadas pela ARRA (1997), onde três destas se enquadram nas técnicas de reciclagem à frio e serão expostas a seguir.

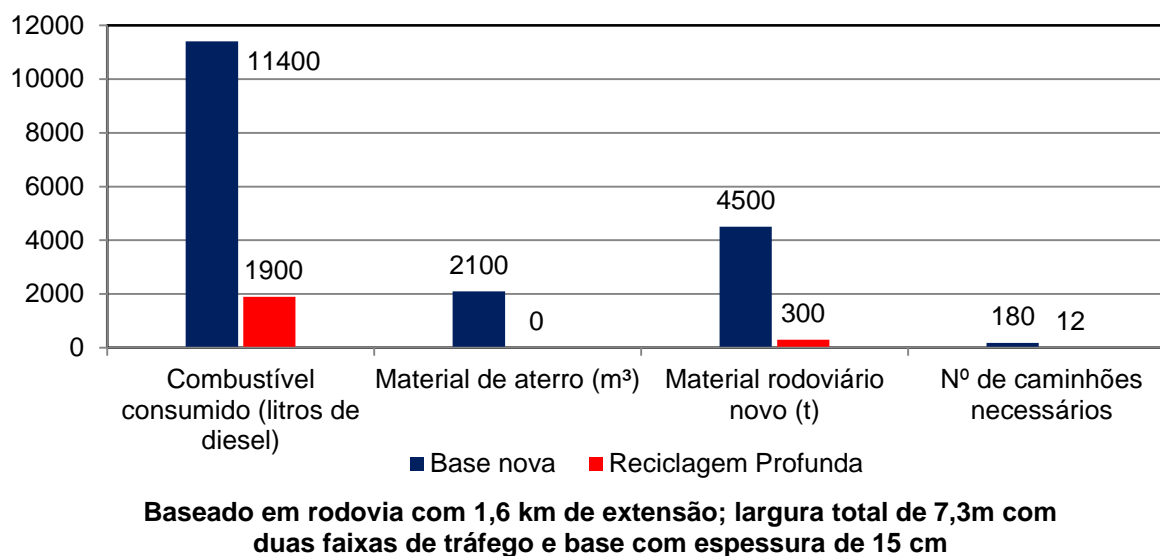


Figura 10 – Comparativo de construção de base nova e reciclagem profunda

.Fonte: Adaptado de PCA (2013).

2.4.1 Reciclagem a frio *in situ* (espessura parcial)

A reciclagem a frio *in situ* é definida como uma técnica em que os materiais existentes no pavimento são reutilizados no próprio local. Os materiais são misturados sem aplicação de aquecimento. A operação é realizada utilizando máquinas de reciclagem, as quais evoluíram de máquinas fresadoras e

estabilizadoras de solo. São máquinas especializadas e apresentam capacidade de reciclar uma camada espessa de pavimento numa simples passada (DAVID, 2006).

A reciclagem parcial aplica-se em pavimentos deteriorados com defeitos localizados somente no revestimento asfáltico, não havendo problemas estruturais de base ou subleito. O propósito dessa técnica é a eliminação de problemas superficiais como o trincamento por fadiga, a irregularidade superficial, o desgaste e a baixa resistência à derrapagem. (HALL et al. 2001 apud DAVID, 2006).

2.4.1.2 Métodos de execução e equipamentos

O procedimento consiste em fresar a camada asfáltica até certa profundidade sem afetar a base. O material removido é misturado com agente de reciclagem que pode ser emulsão asfáltica, espuma de asfalto ou agente de reciclagem emulsionado, que complementa a quantidade de ligante da mistura, possibilitando o reaproveitamento da mesma com as características definidas em projeto. Caso necessário, pode ser adicionado agregado virgem á mistura, este que é espalhado na pista previamente. Após a operação de mistura dos materiais procede-se o espalhamento e a compactação da mistura reciclada (DAVID, 2006). A figura 11 mostra o esquema básico do processo de reciclagem parcial a frio *in situ*:

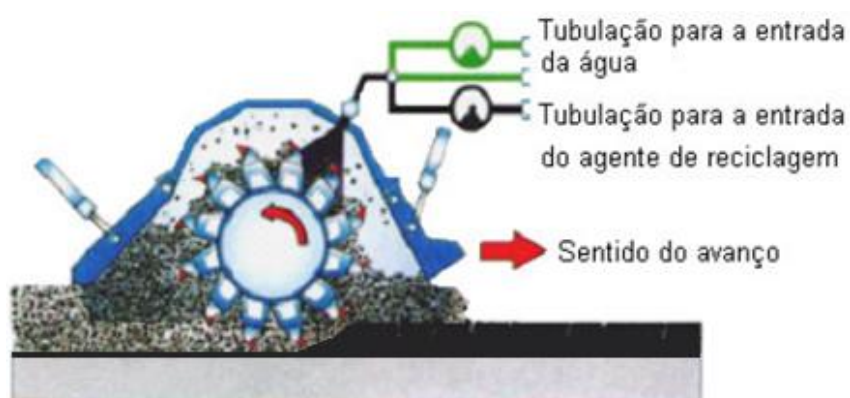


Figura 11 – Reciclagem parcial a frio *in situ*

Fonte: Adaptado de WIRTGEN (2012).

Segundo a ARRA (1997) as etapas para execução da reciclagem de revestimento a frio são:

- Preparação da área a ser reciclada;
- Fresagem do pavimento existente;
- Adição de agente de reciclagem e materiais virgens;
- Nivelamento;
- Compactação;
- Locação da camada de rolamento.

Dois métodos diferentes para a reciclagem a frio *in situ* são utilizados, atualmente. São eles: máquina única *single-pass* e trem de equipamentos *single-pass*. Os dois métodos serão discutidos a seguir.

- **Método da máquina única *single-pass*:**

Este equipamento é o único capaz de desintegrar, pulverizar o pavimento e adicionar agentes de reciclagem em uma única passagem. O sistema consiste basicamente de uma unidade recicladora e outra pavimentadora. A figura 12 demonstra um esquema básico do processo.

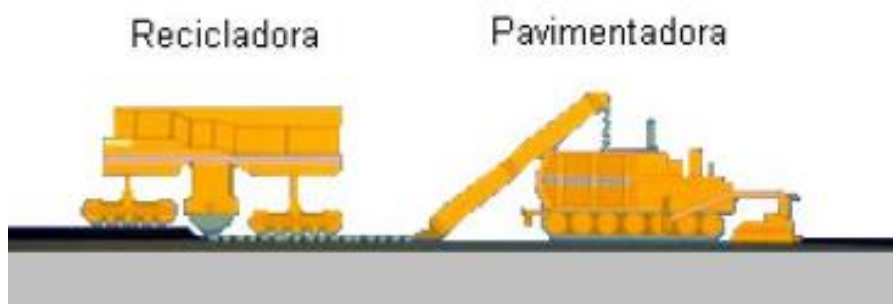


Figura 12 – Método da máquina única *single-pass*

Fonte: Adaptado de ARRA (1997).

O material virgem, se necessário é espalhado na superfície à frente do equipamento de reciclagem. O agente de reciclagem é adicionado na câmara de moagem da pavimentadora. O RAP é adicionado por fresagem a frio (por uma máquina de fresagem) ou por um caminhão transportador (ARRA, 1997).

- **Método do Trem de Equipamentos *single-pass*:**

O trem de equipamentos *single-pass* consiste de uma série de equipamentos, cada um designado para uma função em particular. Os componentes mais comuns são: uma máquina fresadora, um britador/peneirador móvel, uma unidade de mistura e uma unidade pavimentadora. Na execução do processo, a unidade de britagem e peneiramento esmagam e peneiram o material de tamanho desproporcional proveniente da fresagem, deposita o material processado em um misturador do tipo *pugmill*, onde é adicionado o agente de reciclagem. Após a mistura o material é depositado sobre a pavimentadora para posterior aplicação e assentamento, ou disposto em leiras. Se for disposto em leiras, é pego em seguida por uma pavimentadora para assentamento (ARRA, 1997). A figura 13 demonstra um esquema básico do processo.

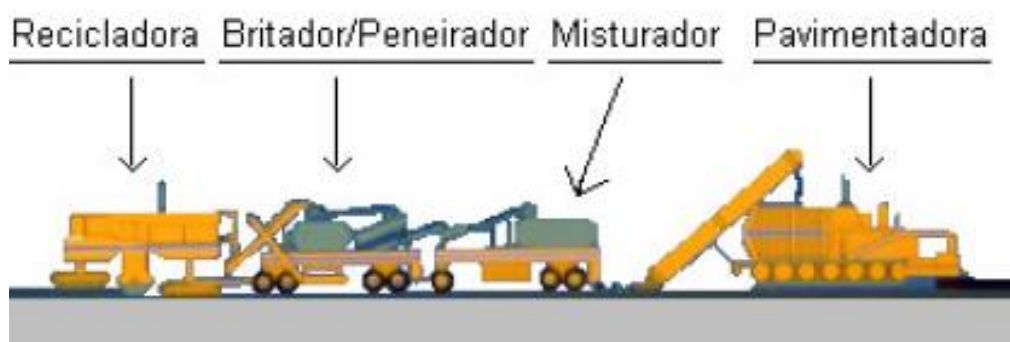


Figura 13 – Método do Trem de Equipamentos *single-pass*

Fonte: Adaptado de ARRA (1997).

2.4.1.3 Reciclagem a frio *in situ* com adição de Emulsão Asfáltica

As emulsões asfálticas, são materiais constituídos de uma mistura de asfalto e água estabilizada por agentes emulsificantes. Essa estabilidade garante às emulsões a propriedade de se manterem em estado líquido em temperatura ambiente, o que lhes confere trabalhabilidade sem a necessidade de aquecimento. Devido a esta característica, as emulsões são o material ideal para o processo a frio de reciclagem.

Porém, quando são aplicadas na mistura asfáltica, ocorre a perda de estabilidade de mistura entre água e asfalto e conseqüente separação das fases constituintes, por simples evaporação da água ou por atração eletrostática que o agregado exerce sobre o asfalto. A esse fenômeno damos o nome de “ruptura”.

Segundo a ARRA (1997) as emulsões assumem um papel crucial no processo de reciclagem a frio, pois ajudam a aumentar a coesão e a capacidade de carga da mistura asfáltica reciclada. Ela também ajuda no rejuvenescimento e amolecimento do ligante asfáltico envelhecido presente no pavimento a ser reciclado. A vantagem em utilizar a emulsão é que, devido a sua baixa viscosidade, é perfeitamente adequada para aplicação através do sistema de adição presente nos equipamentos de reciclagem. Devido à ruptura, a água será forçada a sair da mistura asfáltica durante a compactação ou durante o período de cura. O cimento asfáltico resultante terá alta viscosidade e, portanto, irá melhorar o desempenho do material de base.

2.4.2 Reciclagem a frio *in situ* com profundidade total (*Full Depth Reclamation*)

A ARRA (1997) define “*full depth reclamation*” como um método em que toda a seção do revestimento asfáltico e uma quantidade predeterminada de material subjacente são tratadas para produzir uma camada de base estabilizada. Diferentes tipos de aditivos, tais como emulsões e agentes químicos, mais precisamente cloreto de cálcio, cimento Portland, cinzas volantes e cal, são somados para se obter uma base melhorada.

Segundo a ARRA (1997), há algumas vantagens importantes na utilização deste método:

- A estrutura do pavimento pode ser melhorada de forma significativa, sem alterar a geometria do pavimento;
- Restaurar pavimento antigo para o perfil desejado, eliminar sulcos em trilhas de rodas existentes, restaurar inclinações, e eliminar buracos e irregularidades. Operações de alargamento do pavimento também podem ser executadas neste processo;
- Eliminar trincas do tipo couro de jacaré, transversal, longitudinal e trincas por reflexão;
- O custo de produção é reduzido, e apenas uma fina camada ou revestimento é necessário na maioria dos projetos;
- Custos de engenharia são baixos;
- Materiais e energia são conservadas, e os problemas de qualidade do ar decorrentes de poeira e fumaça são eliminados. O processo é ecologicamente desejável, uma vez que são evitados problemas de bota-fora.

2.4.2.1 Métodos de execução e equipamentos

De acordo com a ARRA (1997), há quatro formas de execução do método *full depth*, são denominadas:

- *Mutiple-step sequence* ou sequência de múltiplas etapas – nesse método, diferentes máquinas estão envolvidas na execução e, embora existam máquinas pré-estipuladas e disponíveis para emprego nesse método, há deficiência no controle de profundidade, limitação da largura de operação, problemas de controle de tráfego e contaminação da camada asfáltica com material de base caso o projeto determine apenas reciclagem de toda espessura do revestimento.
- *Doble-step sequence* ou sequência de duas etapas – nesse método há uma etapa de quebra e desintegração do revestimento que resulta em uma pré-moagem do pavimento, essa operação é combinada com o procedimento de fresagem a frio e a mistura é feita por um equipamento de mistura e estabilização de

solos. As desvantagens desse método incluem a necessidade por mão-de-obra treinada e equipamentos especializados, porém, possui alta capacidade de produção;

- Método da máquina única;
- Método do trem de equipamentos *single-pass*.

Os dois últimos processos citados são iguais ao que já foi mostrado anteriormente, porém, no método *full depth* o pavimento é tratado em toda espessura do revestimento asfáltico ou atingindo parcialmente a camada de base.

2.4.2.2 Reciclagem a frio *in situ* com Espuma de Asfalto

A tecnologia de reciclagem a frio com espuma de asfalto consiste no reaproveitamento de estruturas de pavimento danificadas através da adição de agregados pétreos, cimento Portland e de espuma de asfalto obtendo-se, assim, bases recicladas de boa qualidade (DNIT – ES 166/2013). A figura 14 demonstra o esquema que representa a formulação e adição da espuma de asfalto no processo de reciclagem a frio *in situ*.

A espuma de asfalto está sendo cada vez mais utilizada na reciclagem *full depth*. A espuma facilita a melhor dispersão do asfalto para os materiais a serem reciclados. Uma pequena quantidade de água é injetada no asfalto quente ao passo que já vai sendo misturada com o pavimento reciclado ou solo (ARRA, 1997).

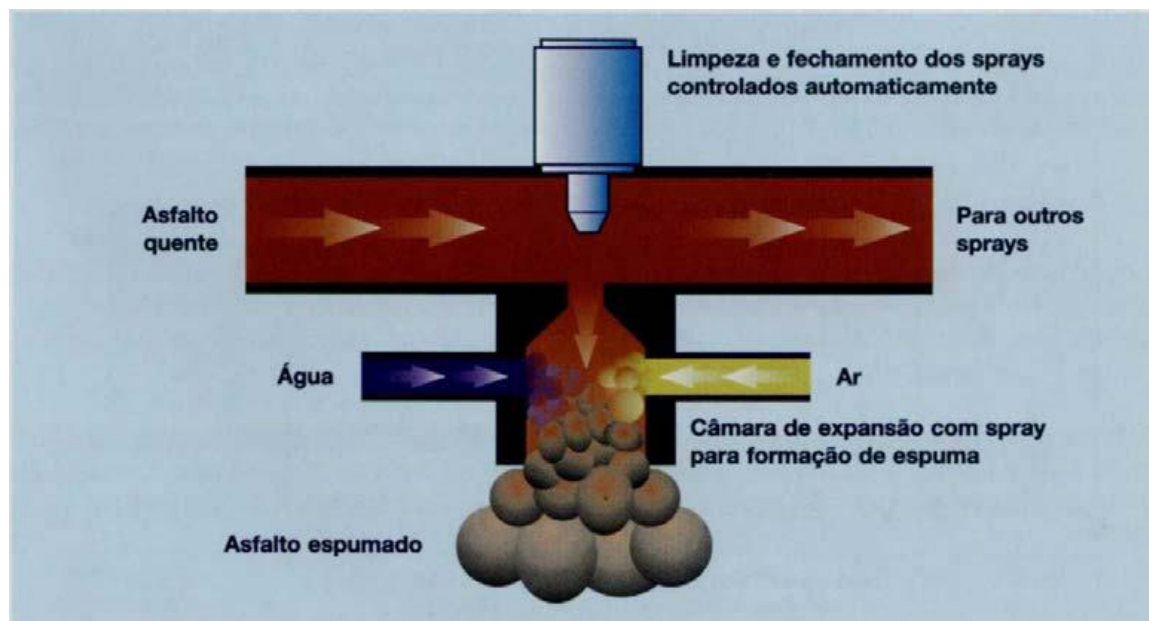


Figura 14 – Produção da espuma de asfalto

Fonte: WIRTGEN, 2001 apud CASTRO, 2003.

2.4.2.3 Reciclagem a frio *in situ* com cimento Portland

Esta técnica de reciclagem visa obter uma camada de pavimento com aproveitamento de materiais da pista com a incorporação de cimento Portland e agregados naturais, quando necessário. É um processo de reconstrução parcial da estrutura do pavimento, utilizando materiais em proporções definidas em projetos de dosagens, respeitando normativas como a DNIT 167/2013 – ES: Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “*in situ*” com adição de cimento Portland – Especificação de serviço.

O processo construtivo compreende a operação simultânea de desagregação do pavimento e incorporação de materiais novos (espalhados previamente sobre a pista), mistura e homogeneização “*in situ*”, compactação e acabamento, segundo alinhamento e cotas definidos no projeto geométrico, resultando numa camada nova de pavimento (DNIT 167/2013 – ES, p.5).

A figura 15 apresenta um esquema da reciclagem de base com a utilização do cimento Portland, a figura 16 mostra os métodos de espalhamento do estabilizante químico na pista.

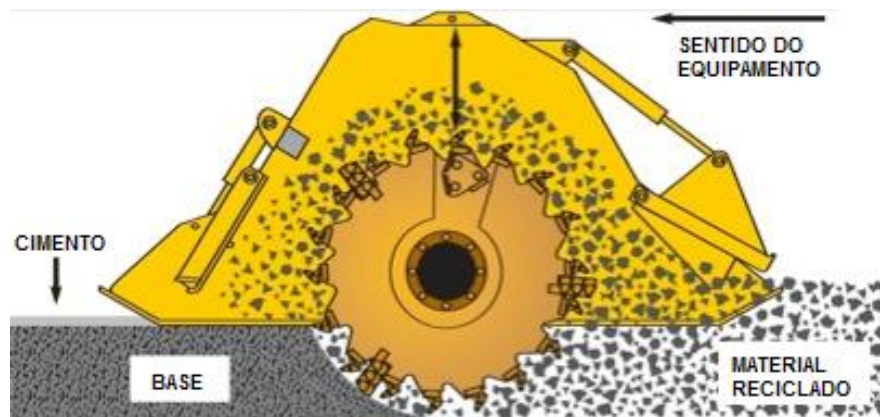


Figura 15 – Esquema de reciclagem *in situ* com cimento Portland

Fonte: Adaptado de Brown Brown, 2011.

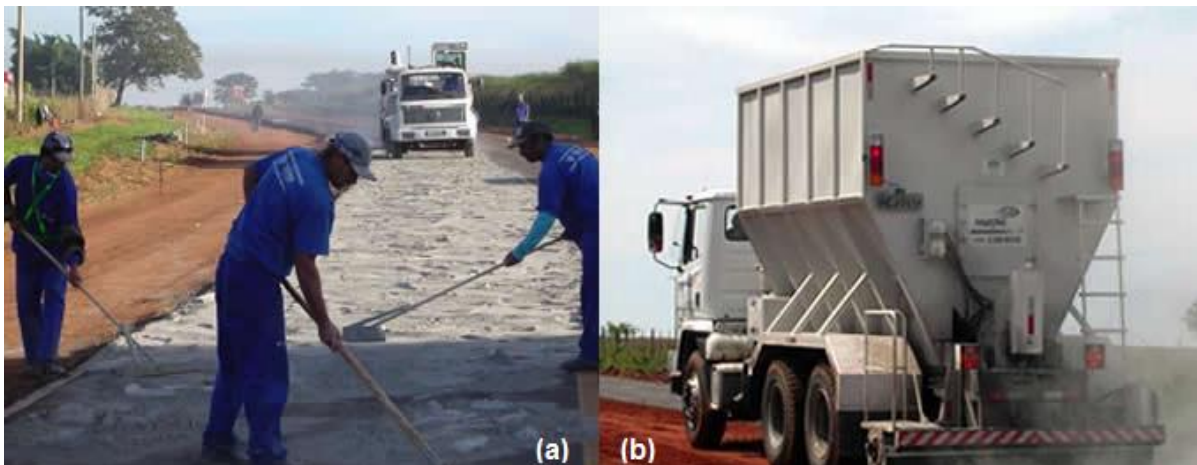


Figura 16 – Métodos de espalhamento do cimento Portland: Manual (a) e mecanizado (b).

Fonte: Adaptado de Vias Concretas, 2014.

2.4.3 Restrições e limitações das técnicas de reciclagem a frio *in situ*

Os métodos de reabilitação de pavimentos que envolvem a aplicação de reciclagem a frio têm sido mais justificáveis no que diz respeito a custo de produção, consumo de energia, e condições de trabalho para os operários, já que não necessitam de aquecimento no processo de execução. Porém, possuem limitações que podem ser decisivos no momento da escolha no método de reabilitação a ser empregado.

A reciclagem a frio de pavimentos pode ser empregada somente na formulação de bases asfálticas a partir de um pavimento existente deteriorado, não podendo ser aplicado na concepção de revestimentos, visto que a mistura resultante não apresenta bom desempenho quando exposta a tráfegos severos. Diferentemente, os métodos de reciclagem a quente possibilitam essa aplicação.

O emprego das técnicas de reciclagem a frio, a exemplo dos processos a quente, também exige a utilização de maquinário específico e em alguns casos, mão-de-obra treinada, o que acaba tornando o processo mais oneroso. Devido a isso, as recicladoras só estão disponíveis para grandes obras.

Podem surgir, também, problemas de controle de qualidade. Visto que a profundidade (no método *full depth*) de serviço pode atingir até a camada de base, contaminando o material asfáltico caso o objetivo da reciclagem contemple apenas a camada de revestimento.

Contudo, no Brasil os investimentos na área de reciclagem de pavimentos estão voltados para os processos a frio. Há um crescente interesse das empresas do ramo na utilização das técnicas, visto que os benefícios que trazem ao meio ambiente são indiscutíveis e o desempenho quando devidamente empregadas é satisfatório.

2.5 Técnicas de reciclagem de pavimentos à quente

As técnicas de reciclagem a quente, de acordo com a classificação da ARRA (1997), diferem de acordo com a temperatura em que ocorrerá o processo, se será a

temperatura ambiente (a frio), ou se será sob condições de aquecimento dos materiais (a quente). As técnicas são, também, subdivididas de acordo com o local onde irá acontecer a mistura dos materiais, se no próprio local onde está sendo executada a obra (*in situ*) ou em usina estacionária. Além disso, o termo “a quente” não se refere à maneira como o pavimento antigo é removido para reciclagem, pois esse processo pode ser realizado a quente, através do aquecimento do pavimento até a profundidade que se deseja remover e posterior remoção da camada, ou a frio, com a utilização do processo de fresagem. Refere-se à temperatura em que ocorre a mistura e compactação dos componentes oriundos da reciclagem e os materiais “virgens” que serão adicionados.

O Grupo Wirtgen, especializado na execução de obras de reciclagem, afirma que o processo a quente é um método utilizado exclusivamente para recuperação de superfícies de pavimentos asfálticos danificadas e, que através desse método é possível restabelecer todas as propriedades relevantes, tanto do revestimento quanto da camada subjacente, bem como a composição dos agregados na camada de desgaste. Ele ajuda a restaurar a resistência à derrapagem, a capacidade de drenagem da pista e a eliminar o afundamento nas trilhas de roda (WIRTGEN, 2012).

2.5.1 Reciclagem a quente *in situ*

Define-se reciclagem a quente *in situ* de pavimentos, como o processo de remoção e processamento, no local da obra, do material asfáltico e granular de um pavimento flexível com a utilização do calor, transformando-o em uma nova mistura asfáltica e posterior compactação a quente.

O DNIT ainda discrimina a utilização de material granular adicional para correção de granulometria, adição de filer e o emprego de maquinário específico para aplicação do método.

2.5.1.1 Aplicações e Defeitos

A reciclagem a quente in situ é, portanto, uma técnica utilizada unicamente para solucionar problemas decorrentes de defeitos em pavimentos, e assim atua ao lado da eficiência e economia. Wirtgen (2012) determina quais são os principais defeitos, como interferem no desempenho do pavimento e de que forma a técnica de reciclagem em questão é utilizada na resolução do problema. Temos então o afundamento em trilha de roda.

- **Afundamento em trilha de roda:**

As deformações permanentes em trilhas de roda são como sulcos que ocorrem geralmente no sentido longitudinal do pavimento e são causados por deficiência na estabilidade da camada de desgaste. As razões prováveis para este defeito estão relacionadas ao ligante, onde seu percentual está muito alto com relação à mistura, onde temos uma “massa gorda”, e também com o baixo teor de agregados graúdos na granulometria utilizada na mistura.

O conforto do motorista, ao trafegar na rodovia, não é tão afetado pelos afundamentos em trilha de roda quanto a sua segurança, visto que, com a ocorrência de chuva a água acumula no sulco formado nas trilhas, resultando em uma película de água que irá reduzir drasticamente a área de contato entre o pneu e o pavimento, o que garante as condições de atrito, estabilidade e dirigibilidade do veículo. A reciclagem a quente trata desse problema adicionando misturas corretivas contendo agentes de ligação mais rígidos ou uma alta proporção de agregados graúdos com grãos de alta qualidade.

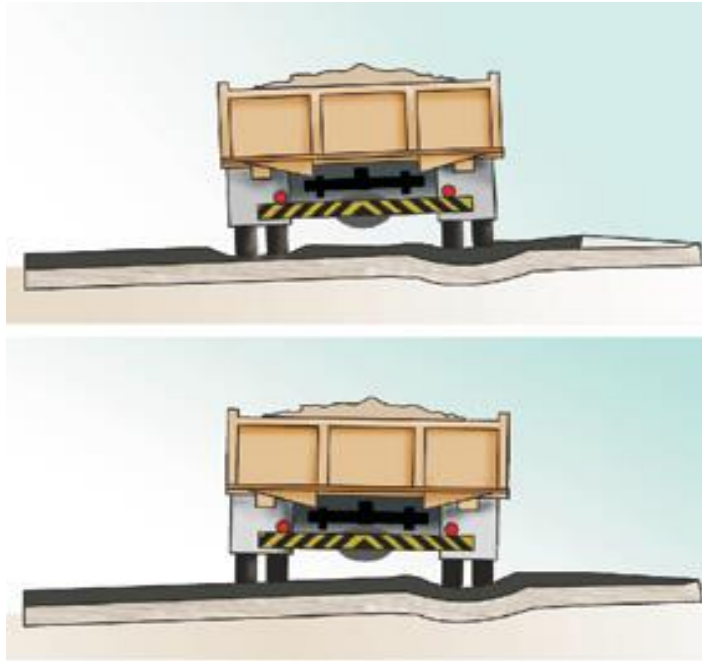


Figura 17 – Deformação permanente

Fonte: Bernucci et al. (2008).



Figura 18 – Afundamento em trilha de roda com presença de água na superfície

Fonte: Wirtgen (2012).

- **Baixa resistência à derrapagem:**

Quando o percentual de ligante asfáltico no revestimento é muito alto, o pavimento da rodovia se torna escorregadio, principalmente na ocorrência de chuvas. A aderência dos pavimentos também pode ser afetada adversamente por um percentual insuficiente de agregado graúdo. Se for esse o caso, pode ser adicionada ao processo de reciclagem uma mistura asfáltica corretiva de alta qualidade ou adicionar agregados graúdos na mistura reciclada.

- **Fissuras na camada de desgaste do pavimento:**

A fissuração ocorre na superfície de uma rodovia quando o pavimento se torna rígido ou quebradiço, como apresentado o exemplo na figura 19. As possíveis causas estão relacionadas a erros na dosagem do ligante asfáltico, erros de execução, espessura inadequada do revestimento ou ancoragem deficiente entre as camadas do pavimento. No processo de reciclagem, a adição de ligantes suaves protege o novo revestimento de fissurar em médio prazo.



Figura 19 – Revestimento em avançado grau de fissuração

2.5.1.2 Métodos de execução e equipamentos

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006), a reciclagem a quente de pavimentos ainda é um processo relativamente novo e a variabilidade dos materiais removidos é maior se comparado com materiais novos. Isso exige que sejam tomados cuidados especiais na formulação do projeto e na construção de camadas com misturas recicladas a quente. Devido a esta variabilidade existem ainda incertezas quanto ao desempenho das misturas e, sua aplicação em camadas de rolamento ainda não é extensiva no Brasil.

Este método traz consigo algumas vantagens importantes que propiciam a economia de grandes montantes. Podem ser descritos principalmente, a redução no tempo de interrupção do tráfego na rodovia e a minimização da necessidade por transportes de materiais, já que a maior parte destes a serem utilizados são provenientes do próprio pavimento a ser reciclado e o processo de mistura acontece no local da obra.

São estabelecidos dois processos básicos de reciclagem a quente *in situ* de pavimentos asfálticos e seus respectivos equipamentos:

No primeiro sistema, o pavimento é aquecido através de um circuito de ar quente (até 600°C) que com a ajuda de um sistema de infravermelhos que está sobreposto à camada a reciclar, permite que o pavimento atinja temperaturas de 150 a 160°C numa espessura de até 6 cm de profundidade. Seguidamente o pavimento quente é fresado, entrando posteriormente num misturador onde se junta um agente rejuvenescedor. Após isso, a mistura é colocada numa espalhadora de misturas betuminosas do equipamento, que lança o novo material no pavimento para em seguida ser compactada.

No segundo sistema o material é fresado a frio e colocado num tambor secador misturador, onde se adiciona o agente rejuvenescedor. Posteriormente, é colocado numa espalhadora e compactado.

Para execução, a ARRA (1997) destaca de forma distinta e mais aprofundada as etapas necessárias a um processo de reciclagem a quente *in situ*, que se dá da seguinte maneira:

- Amolecimento da superfície do pavimento asfáltico com calor;
- Fresagem e/ou remoção mecânica do material da superfície;

- Mistura do material com agentes rejuvenescedores e ligante asfáltico;
- Adição de material granular virgem, quando necessário para correção de granulometria;
- Assentamento e compactação da mistura reciclada sobre a superfície do pavimento.

O procedimento pode ser realizado em operações de *single-pass* (passada simples) ou *multiple-pass* (múltiplas passadas). No processo de *single-pass*, materiais virgens são misturados ao RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) que é oriundo do pavimento asfáltico fresado e executado em uma única passagem, ao passo que no processo *multiple-pass*, uma nova camada de rolamento é adicionada após, recompactando o RAP.

A ARRA (1997) reconhece, ainda, três tipos básicos de processos de reciclagem a quente *in situ*, são eles:

- Reciclagem de superfície;
 - Repavimentação;
 - Remistura.
-
- **Reciclagem de superfície:**

A reciclagem de superfície é definida como um processo de reabilitação adequado para pavimentos trincados, frágeis e irregulares, em preparação para um revestimento final de fina espessura. Os pavimentos ideais para esse processo são aqueles cuja base é estável e adequadamente projetada. Apesar de o processo ser capaz de atingir a profundidade de até 50 mm, as espessuras mais usuais estão na faixa entre 20 mm e 25 mm. Pode ser realizado por *multiple-pass*. (ARRA, 1997)

Este método é, também, utilizado para restabelecer as condições geométricas do pavimento garantindo drenagem adequada. É eficiente para retardar e evitar a reflexão de fissuras para a nova camada, isso se antes do revestimento final for aplicada uma camada de mistura quente. Esse processo pode ser otimizado se a camada imediatamente inferior ao revestimento for escarificada, a fim de aumentar a aderência entre elas. A figura 20 mostra o esquema de um processo de reciclagem de superfície.

O processo funciona da seguinte forma: a unidade de pré-aquecimento aquece a superfície do pavimento antigo, a unidade de aquecimento e reciclagem aplica mais calor e fresa o pavimento com um conjunto de dentes não rotativos e agentes de reciclagem. Em seguida, o material do antigo pavimento e os agentes de reciclagem são misturados com um trado padrão e estabilizados com uma placa. Um rolo de pneus de borracha é utilizado para compactar o material reciclado. Nenhum agregado novo é, geralmente, adicionado ao processo de reciclagem de superfície. A figura 21 mostra um processo de reciclagem de superfície.

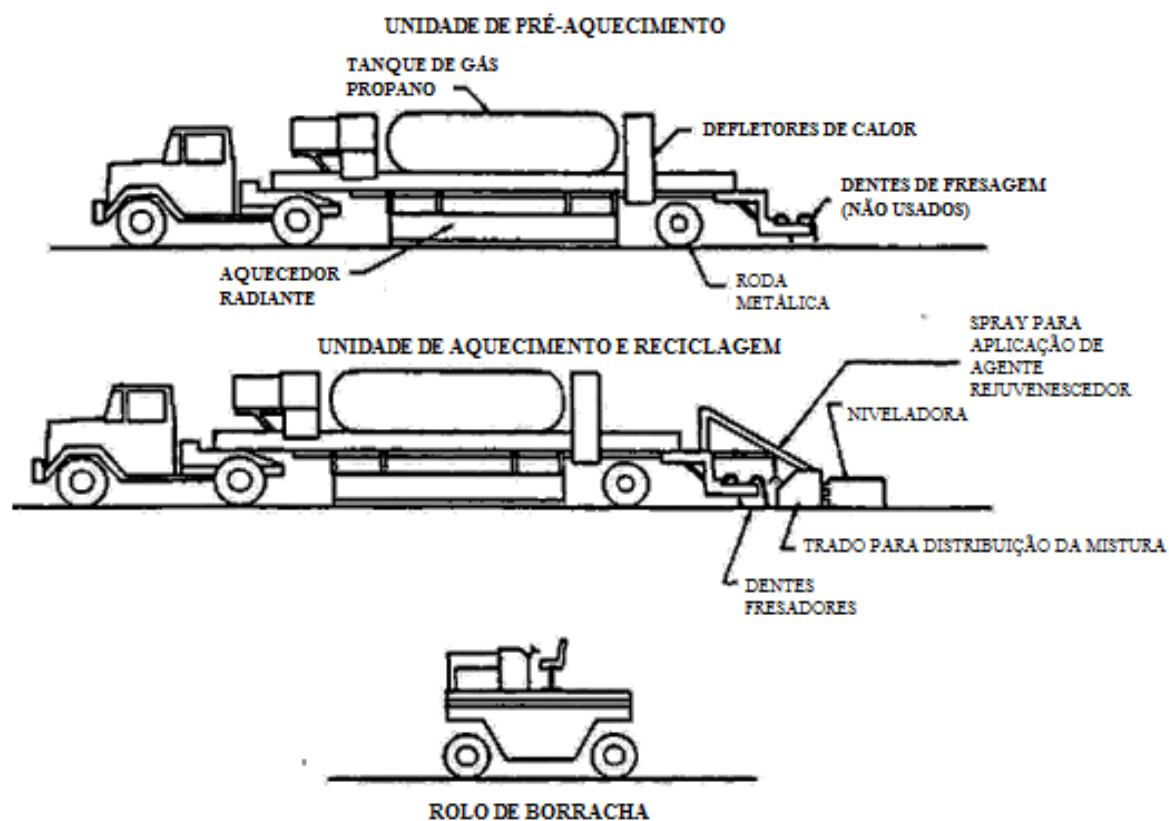


Figura 20 – Esquema do processo de reciclagem de superfície

Fonte: ARRA (1997).



Figura 21 – Processo de reciclagem de superfície

Fonte: ARRA (1997).

- **Repavimentação:**

É o método de reciclagem de superfície combinado com uma sobreposição simultânea de uma nova camada de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) para formar uma ligação térmica entre a camada nova e a reciclada. Este processo é utilizado para corrigir as deficiências da parte superior do pavimento, entre 20 e 50 mm. Defeitos no pavimento, tais como afundamentos em trilha de menor magnitude, trincas por retração térmica e desagregação da mistura podem ser eliminados a partir desse método.

De acordo com a ARRA (1997), o processo de repavimentação torna-se útil quando a reciclagem de superfície não é suficiente para restabelecer as características exigidas de conforto e segurança do pavimento. Revestimentos muito finos, com espessuras da ordem de 12 mm, podem ser usados em conjunto com o processo de repavimentação com rendimento e desempenho satisfatórios.

As figuras 22 e 23 mostram os esquemas de repavimentação por *multiple-pass* e *single-pass*, respectivamente.

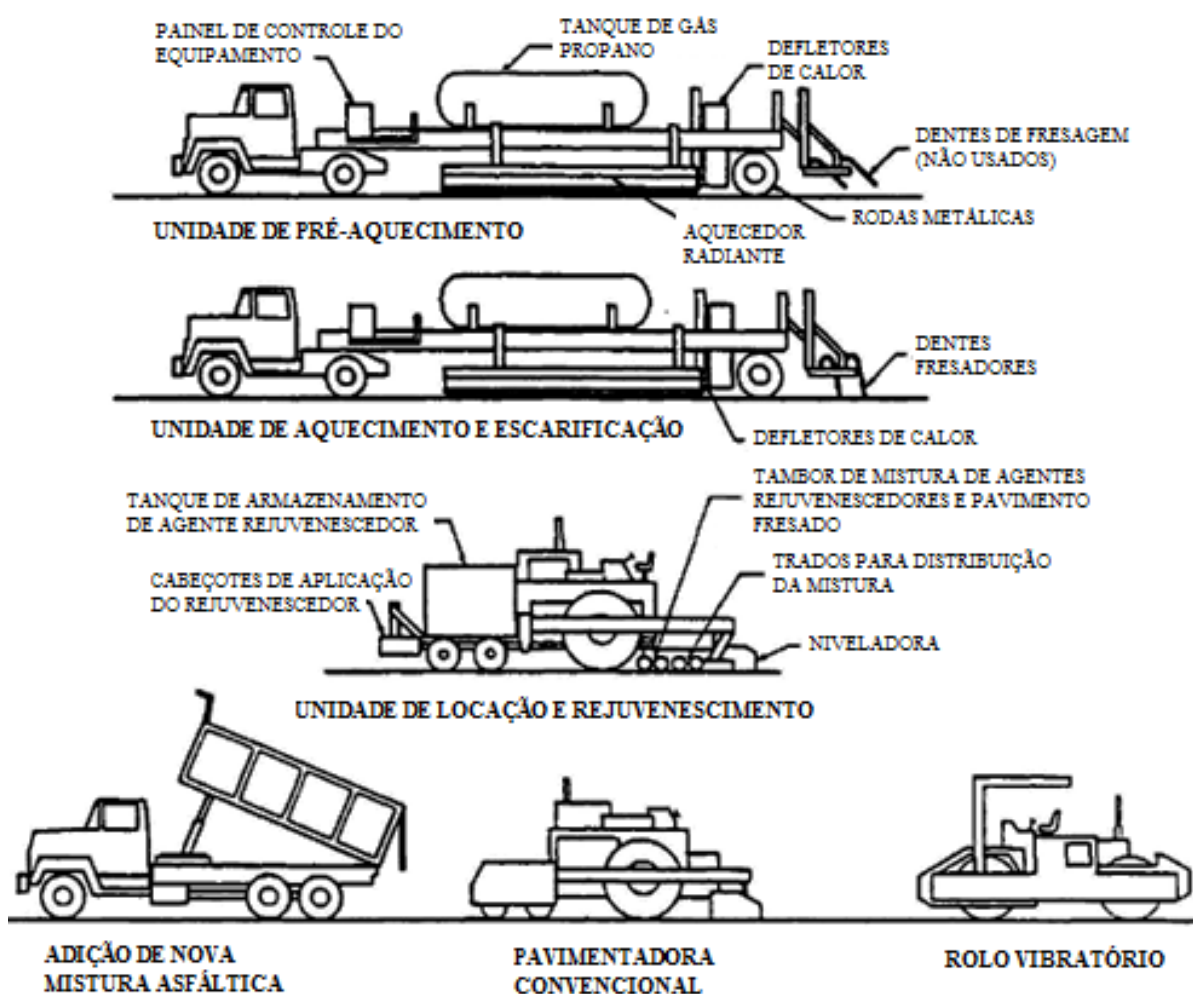


Figura 22 – Esquema do processo de repavimentação por *multiple-pass*

Fonte: ARRA (1997).

O processo consiste de pré-aquecimento, posterior aquecimento e escarificação e/ou moagem rotativa, aplicação e mistura de um agente de reciclagem, aplicando a mistura reciclada como uma camada de nivelamento e, finalmente, a colocação de um novo revestimento de CBUQ.

No processo *single-pass* de repavimentação são usadas duas argamassas de CAP. Uma é aplicada para nivelar a mistura fresada e a outra para nivelar a camada nova de CBUQ. Os passos até a colocação da mistura reciclada são semelhantes aos do processo de reciclagem de superfície.



Figura 23 – Esquema do processo de repavimentação por *single-pass*

Fonte: ARRA (1997).

A figura 24 a seguir mostra a execução do processo de repavimentação pelo método *single-pass*.



Figura 24 – Processo de repavimentação

Fonte: ARRA (1997).

- **Remistura:**

Este método é normalmente utilizado quando o processo de repavimentação não é suficiente para restabelecer as propriedades desejáveis do pavimento no que diz respeito a conforto e segurança do usuário da rodovia. Nesse processo são adicionados agregados e/ou CBUQ novo, o que garante o restabelecimento da capacidade de suporte e estabilidade para o pavimento reciclado (ARRA, 1997).

Através desse método é possível se eliminar, efetivamente, afundamentos e fissuras e, também corrigir o problema da oxidação (endurecimento) do ligante asfáltico nos 50 mm superiores da superfície do pavimento. A seguir o esquema simplificado do processo de remistura na figura 25, e uma vista parcial deste processo na figura 26.

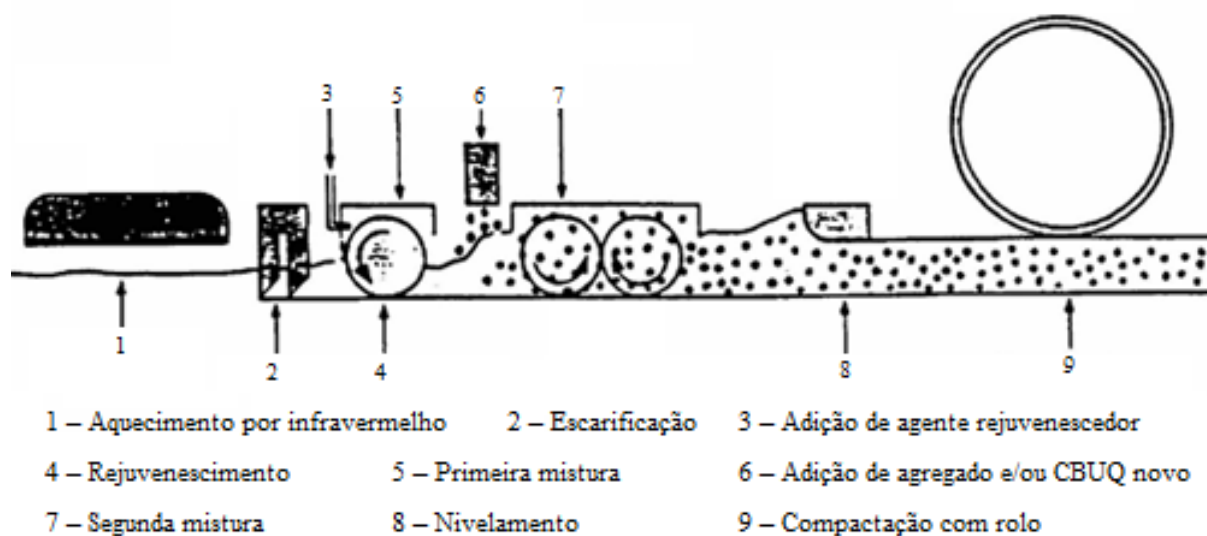


Figura 25 – Esquema do processo de remistura

Fonte: ARRA (1997).

No processo de execução, o pavimento é primeiramente aquecido e amolecido por aquecedores infravermelhos em unidades de pré-aquecimento. A temperatura do asfalto é elevada até níveis compreendidos entre 85°C e 104°C. O

material então amolecido é escarificado e coletado em uma leira. A remoção pode ser feita por escarificadores fixos, podendo ser seguida de um conjunto adicional de fresadores e atinge profundidades que variam entre 25 mm e 40 mm, embora possa alcançar mais de 50 mm. O material coletado na leira é misturado com agentes de reciclagem e agregados virgens para recomposição da granulometria. A partir daí o material é espalhado por um conjunto de brocas transversais. Uma mesa vibratória é utilizada então para compactar parcialmente o material. O processo final de compactação é realizado pelo método usual.



Figura 26 – Vista parcial do processo de remistura

Fonte: ARRA (1997).

2.5.1.3 Restrições e limitações

Como se pode verificar no decorrer da demonstração das técnicas de reciclagem à quente *in situ*, a aplicação dos métodos compreende a utilização

ostensiva de equipamentos de funcionamento complexo e elevado custo de aquisição e manutenção.

As limitações do emprego da técnica estão diretamente ligadas à escassez dos recursos financeiros disponíveis, por parte do país e da iniciativa privada a cerca da aquisição e manutenção do maquinário necessário para realização dos serviços.

2.5.2 Reciclagem à quente em usina estacionária

Segundo o DNIT (2006), concreto asfáltico reciclado a quente em usina estacionária é a mistura realizada em central com características específicas, utilizando-se como agregado o material do revestimento asfáltico removido a frio do pavimento existente, cimento asfáltico e agregados adicionais e, se necessário, materiais de enchimento (filer), assim como agente de reciclagem misturado, espalhado e comprimido a quente. Este poderá ser empregado como revestimento, base, regularização ou reforço do pavimento.

Uma mistura asfáltica reciclada a quente resulta da combinação de misturas betuminosas envelhecidas de pavimentos asfálticos existentes, normalmente resultantes da fresagem das camadas superiores destes pavimentos, e de materiais novos, agregados e asfalto. (BAPTISTA, 2006)

A figura 27 traz um esquema simplificado dos materiais constituintes de uma mistura reciclada a quente.



Figura 27 – Esquema dos materiais de uma mistura asfáltica reciclada a quente

No que diz respeito às aplicações da técnica, pode-se estender o que foi apresentado pela Reciclagem a Quente *In Situ*. Porém, no âmbito da logística os dois métodos são completamente diferentes. A reciclagem a quente em usina consistirá, de remoção do pavimento existente por fresagem, onde material fresado será lançado em caminhões que ficarão a cargo do transporte até uma central de mistura a quente, onde haverá, ainda, a adição de materiais novos, como agregados e cimento asfáltico. Em seguida, ocorre a mistura do material fresado com os materiais novos e o conseguinte transporte da mistura final reciclada até o canteiro de obras para ser efetuada a pavimentação. A figura 28 demonstra o processo básico da reciclagem à quente em usina.



Figura 28 – Esquema do processo de reciclagem a quente em usina.

2.5.2.1 Métodos de execução e equipamentos

De acordo com ARRA (1997), existem dois processos possíveis para obtenção de misturas asfálticas recicladas a quente em usina, são eles:

- Planta de batelada ou Centrais Gravimétricas;
- Tambor secador misturador ou *Drum Mixer*, ou ainda, Centrais Volumétricas (TSM).

Apesar das centrais gravimétricas apresentarem uma margem de erro menor nos processos de mistura, com relação às centrais volumétricas, devido ao controle intermediário de agregados realizado durante o processo, os procedimentos de reciclagem a quente em usina utilizando as centrais volumétricas têm se mostrado mais vantajosos com relação ao método das usinas gravimétricas. Devido a isto, as tendências de mercado se voltaram para a utilização das centrais com funcionamento a base de TSM.

A ARRA (1997) destaca algumas vantagens importantes das centrais TSM com relação às centrais em lote de mistura:

- **Portabilidade:** as centrais com TSM são mais portáteis e requerem menor tempo de instalação com relação às centrais em lote;
- **Versatilidade:** um percentual relativamente maior de material fresado pode ser incluído na mistura reciclada;
- **Produção:** as taxas de produção são relativamente pouco afetadas pelo percentual de material fresado utilizado;
- **Mistura:** uma mistura mais homogênea pode ser produzida em uma central com TSM desde que o material fresado seja misturado com agregados virgens e ligantes asfálticos por um longo período de tempo.

- **Reciclagem em centrais com Tambor Secador Misturador (TSM):**

Segundo a ARRA (1997), o processo de produção de misturas asfálticas em usinas com TSM, descrito resumidamente, funciona da seguinte forma: os agregados a serem utilizados são dispostos, previamente dosados, conforme especificações de projeto, e armazenados em silos de acordo com sua granulometria. São lançados em uma esteira que os transporta até o TSM. O interior do TSM é continuamente aquecido por uma chama proveniente de um queimador que funciona a óleo ou a gás natural. Os agregados são, em uma primeira etapa, aquecidos e secos para, então, serem misturados ao CAP que é injetado no tambor a jusante da chama nos tambores de fluxo paralelo e, a montante nos tambores de contra fluxo que por sua vez são mais vantajosos e eficientes. A mistura sai do tambor a aproximadamente 155°C pronta para ser empregada na obra. A figura 29 demonstra um esquema do processo.

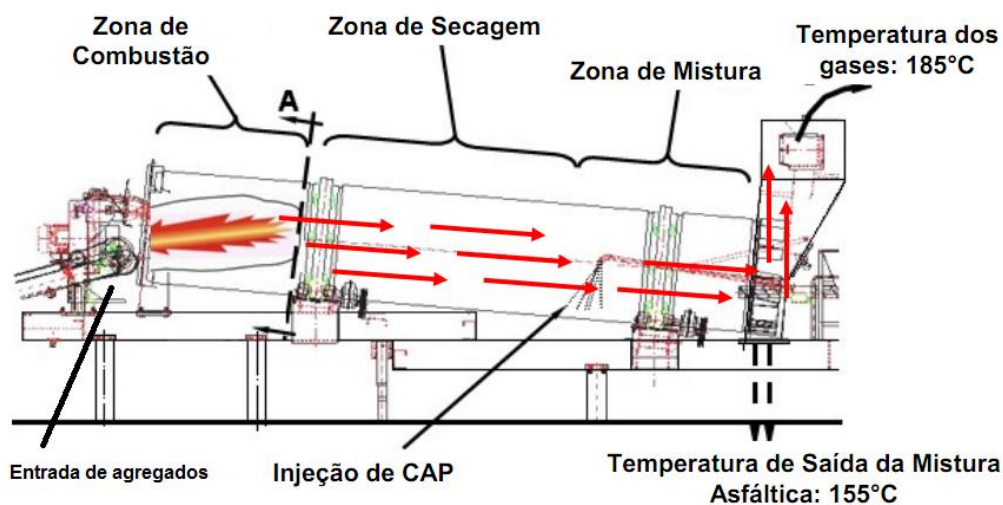


Figura 29 – Esquema do processo no interior de um TSM paralelo

Fonte: Terex (2007).

O material fresado não pode ser processado em usinas *Drum Mixer* convencionais, pois o contato do RAP com a chama do tambor, que tem por finalidade gerar calor para secagem dos agregados virgens que serão incorporados na mistura, irá resultar em queima do ligante envelhecido que está aderido ao material. Essa queima resulta na produção da chamada “fumaça azul”, que acaba prejudicando o funcionamento do sistema (ARRA, 1997).

Pensando nesse problema, chegou-se a conclusão de que poderia ser resolvido de várias maneiras, como por exemplo, incluindo maior teor de umidade no RAP, para que esse fosse apenas aquecido e não queimado. No entanto, medidas como esta iriam diminuir a produção, visto que mais energia seria necessária para aquecer a mistura que estaria mais úmida e mais tempo seria gasto para isso. Verificou-se então, que uma maneira mais eficaz de solucionar o problema seria modificando a central TSM, chegando ao que chamamos de “Tambor Secador Misturador de Entrada Central”.

Embora existam algumas variações nesse processo, é o método mais utilizado para a fabricação de misturas recicladas a quente em usinas volumétricas. Neste processo, o RAP é introduzido no tambor, para misturar com os agregados virgens superaquecidos pelo contato direto com a chama. Os agregados virgens

quentes aquecem o material fresado por condução. O RAP é protegido de entrar em contato direto com a chama por uma densa camada de agregados que é lançada a montante do queimador. A temperatura do agregado virgem cai conforme o RAP é aquecido. A mistura reciclada é elevada até alta temperatura na última etapa do tambor, quando é incorporado asfalto líquido ao processo, completando a mistura. (ARRA, 1997)

É importante destacar o principal fator de distinção entre as centrais TSM que são referentes aos sentidos de fluxo de materiais no interior do tambor. As centrais podem funcionar com fluxo paralelo (Figura 30), o que significa que o sentido de deslocamento dos gases quentes da combustão e dos agregados é o mesmo. Há, também, as centrais de fluxo contracorrente (Figura 31), cujo sentido de fluxo dos gases de combustão é oposto ao sentido do deslocamento dos agregados. (BAPTISTA, 2006)

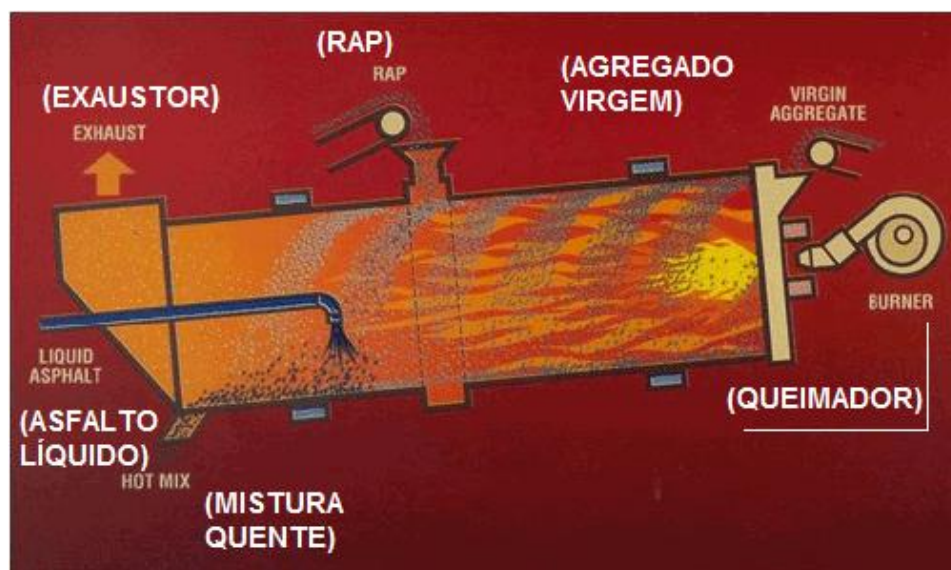


Figura 30 – Tambor secador misturador com entrada central de RAP

Fonte: Adaptado de ARRA (1997).

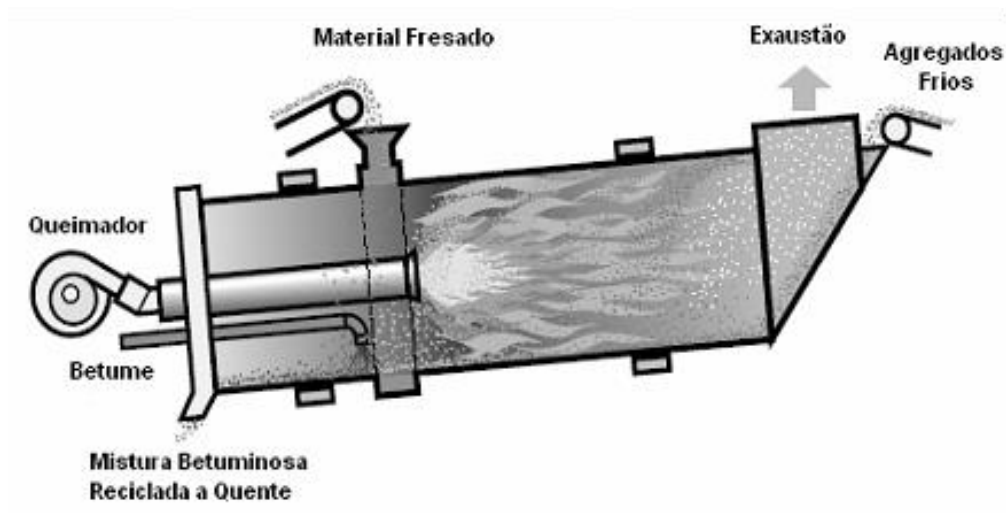


Figura 31 – TSM com entrada central de RAP e fluxo contracorrente

Fonte: Baptista (2006).

As centrais volumétricas evoluíram com o passar do tempo, devido à necessidade de adaptá-las às exigências normativas cada vez mais rigorosas. Sendo assim, alguns modelos distintos de plantas foram desenvolvidos:

- Fluxo paralelo com área de mistura isolada;
- Fluxo paralelo com tubo de secagem do RAP em contra fluxo;
- Fluxo paralelo com misturador contínuo externo;
- Contra fluxo com adição de RAP no misturador externo;
- Contra fluxo com misturador externo e entrada central de RAP;
- Contra fluxo com mistura interna e entrada central de RAP.

2.5.3 Vantagens e Desvantagens

Existem algumas vantagens importantes no emprego da reciclagem a quente em usina estacionária com relação a reciclagem *in situ*. Algumas são: melhor homogeneidade do processo de termo-regeneração; não está restrita a pequenas

espessuras de fresagem para uma reciclagem eficiente; emprego de equipamentos convencionais para transporte, entre outras. (BALBO e BODI, 2004)

Porém, a grande desvantagem ligada ao processo de reciclagem a quente em usina estacionária, está associada ao transporte requerido, tanto para levar o RAP até a usina onde será processado, quanto para retorná-lo ao local da obra para posterior aplicação. Esse fator é decisivo no momento da opção pelo método de reabilitação aplicada em um pavimento, pois agrega muitos custos de transporte e contratempos na obra.

É necessário constatar que o pequeno número de relatos de intervenções existentes dessa natureza, se deve a este inconveniente, já que estas misturas asfálticas, segundo Balbo e Bodi (2004), mostraram em laboratório valores bastante acima dos frequentemente desejados para concretos asfálticos na estabilidade Marshall, para MR e para resistência a tração medida por compressão diametral, com valores de fluência mostrando-se dentro dos padrões aceitáveis convencionalmente. O que prova seu potencial para ser aplicado como recurso de sustentabilidade no país.

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Planejamento da pesquisa

No desenvolvimento do trabalho foram realizados diversos ensaios, tanto no material fresado como nas misturas estabilizadas, com o objetivo de determinar propriedades da engenharia que fossem relevantes. A figura 32 apresenta um fluxograma deste trabalho, com o detalhamento de cada etapa na sequência.

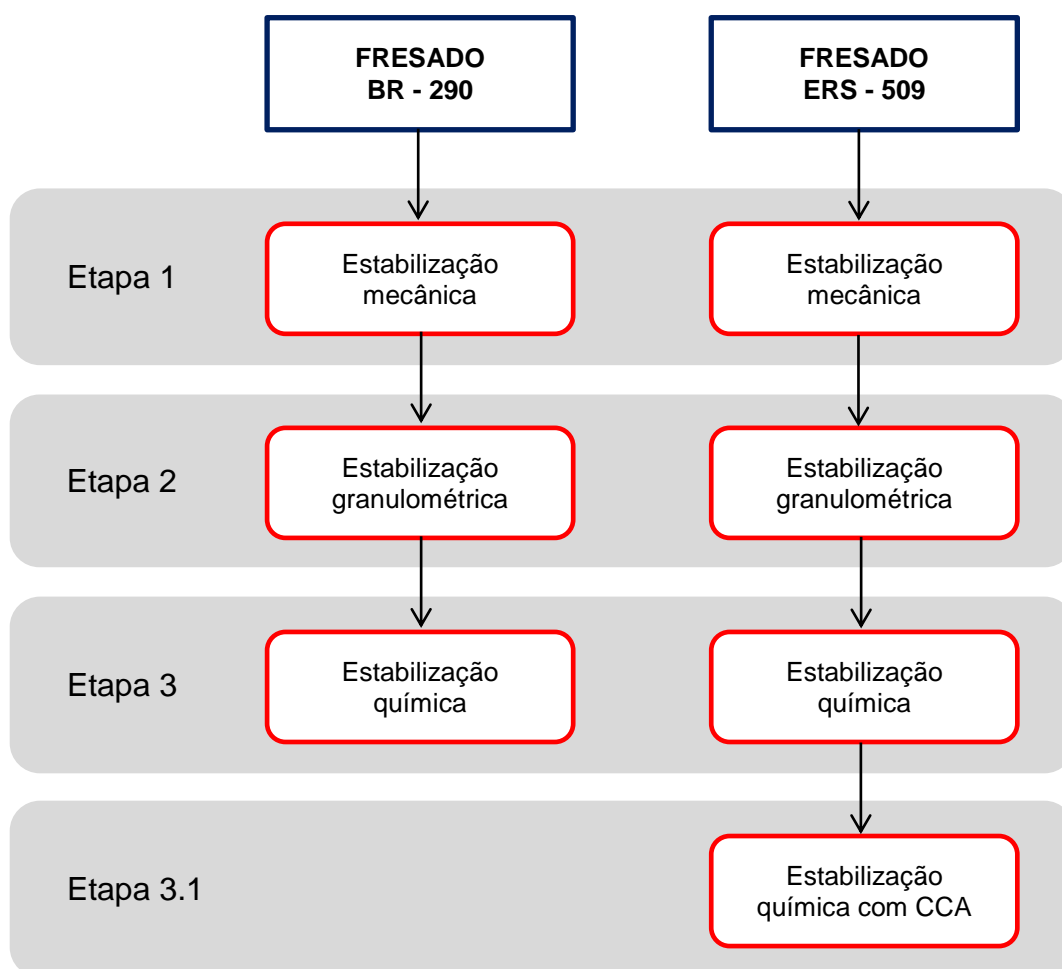


Figura 32 – Fluxograma das etapas da pesquisa

No estudo são testadas três possibilidades de estabilização do material fresado:

Etapa 1: A primeira etapa consiste na estabilização mecânica, onde os materiais de ambas as rodovias são compactados da forma a qual foram extraídos do pavimento, sem adição de outros materiais. Para esta etapa foram realizados ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia.

Etapa 2: A estabilização granulométrica consiste em fracionar os materiais disponíveis com o objetivo de atender às especificações de bases estabilizadas granulometricamente. Para esta etapa foram obtidas misturas contendo material fresado e agregados virgens, e assim como a primeira etapa, foram realizados ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia de cada mistura.

Etapa 3: Com os resultados obtidos nos ensaios da Etapa 2, as misturas estabilizadas granulometricamente foram submetidas à estabilização química com a utilização de cimento Portland. Para esta etapa foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm com diferentes teores de cimento Portland, para então serem submetidos ao ensaio RCS. A forma de aplicação do agente cimentante foi por substituição em massa dos agregados da mistura. A tabela 2 apresenta o número de corpos de prova com suas respectivas percentagens de cimento Portland e tempo de cura em câmara úmida

Tabela 2 – N° de CP's para determinação do teor de cimento

| CP's para RCS e determinação do teor de cimento | | | |
|--|--------------|--------|---------|
| Teor de cimento | Dias de cura | BR-290 | ERS-509 |
| 2% | 7 | 3 | - |
| | 28 | 3 | - |
| 3% | 7 | 3 | 3 |
| | 28 | 3 | 3 |
| 4% | 7 | 3 | 3 |
| | 28 | 3 | 3 |
| 5% | 7 | 3 | 3 |
| | 28 | 3 | 3 |
| 6% | 7 | - | 3 |
| | 28 | - | 3 |
| Total | - | 24 | 24 |

. Devido à sequência de moldagens, os corpos de prova com 2% de cimento Portland e material fresado da ERS-509 foram substituídos por corpos de prova com teor de 6%, pois as amostras com 2% nas misturas do material fresado da BR-290 se mostraram muito frágeis quando tiradas dos moldes. Já a figura 33 apresenta os corpos de prova moldados para ensaio de RCS desta etapa.



Figura 33 – Corpos de prova para ensaio de RCS com diferentes teores de cimento Portland

Etapa 3.1: Esta etapa é uma sequência da Etapa 3, onde a estabilização química é testada com a utilização de CCA em substituição parcial do cimento Portland, apenas para a mistura com material fresado da rodovia ERS-509. A partir dos resultados encontrados na Etapa 3, foi determinado o teor de cimento Portland para realizar a substituição deste pela CCA.

Os corpos de prova foram moldados para ensaios de RCS, RTCD e MR, e em três idades diferentes, 7, 28 e 160 dias de cura em câmara úmida. A tabela 3 apresenta o quantitativo total de amostras ensaiadas, com as discriminações de percentagens substituídas, em massa, do cimento Portland pela CCA, o tempo de cura e as finuras da CCA utilizadas.

A figura 34 apresenta um relato fotográfico dos corpos de prova para ensaio de RCS com diferentes teores de CCA substituídos do cimento Portland. A figura 35 mostra o aspecto dos corpos de prova moldados para RTCD e MR.

Tabela 3 – N° de CP's para os ensaios com substituição de cimento por CCA

| CP's para substituição de cimento por CCA | | | | | |
|---|------------|--------------|----------------|------|----|
| # CCA | Subst. CCA | Dias de cura | RCS | RTCD | MR |
| #325 | 15% | 7 | 3 | 3 | 3 |
| | | 28 | 3 | 3 | 3 |
| | | 160 | 3 | 3 | 3 |
| | 30% | 7 | 3 | 3 | 3 |
| | | 28 | 3 | 3 | 3 |
| | | 160 | 3 | 3 | 3 |
| | 50% | 7 | 3 | 3 | 3 |
| | | 28 | 3 | 3 | 3 |
| | | 160 | 3 | 3 | 3 |
| #500 | 15% | 7 | 3 | 3 | 3 |
| | | 28 | 3 | 3 | 3 |
| | | 160 | 3 | 3 | 3 |
| | 30% | 7 | 3 | 3 | 3 |
| | | 28 | 3 | 3 | 3 |
| | | 160 | 3 | 3 | 3 |
| | 50% | 7 | 3 | 3 | 3 |
| | | 28 | 3 | 3 | 3 |
| | | 160 | 3 | 3 | 3 |
| Referência | | 7 | - ¹ | 3 | 3 |
| | | 28 | - ¹ | 3 | 3 |
| | | 160 | 3 | 3 | 3 |
| Total | | - | 57 | 63 | 63 |

Nota: ¹ resultados de RCS para 7 e 28 dias de cura obtidos na Etapa 2.

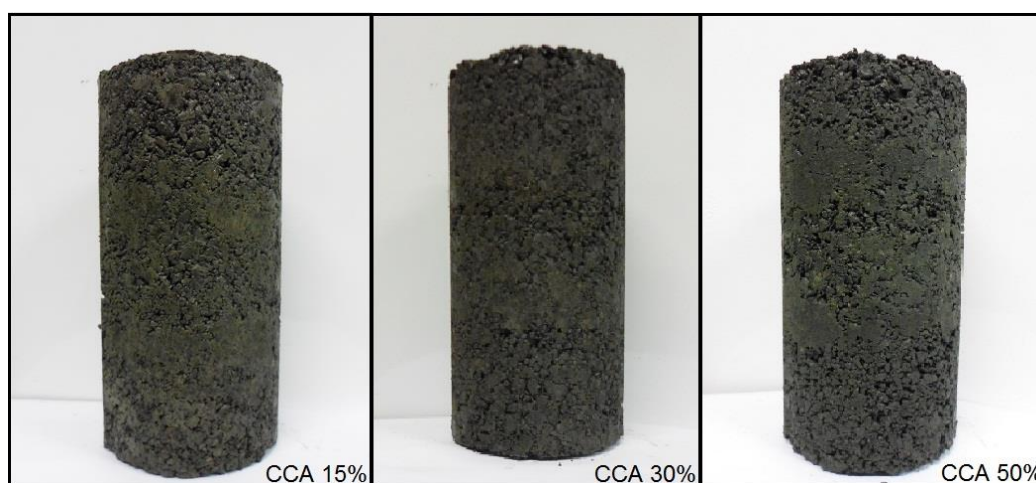


Figura 34 – Corpos de prova para RCS com substituição de cimento por CCA

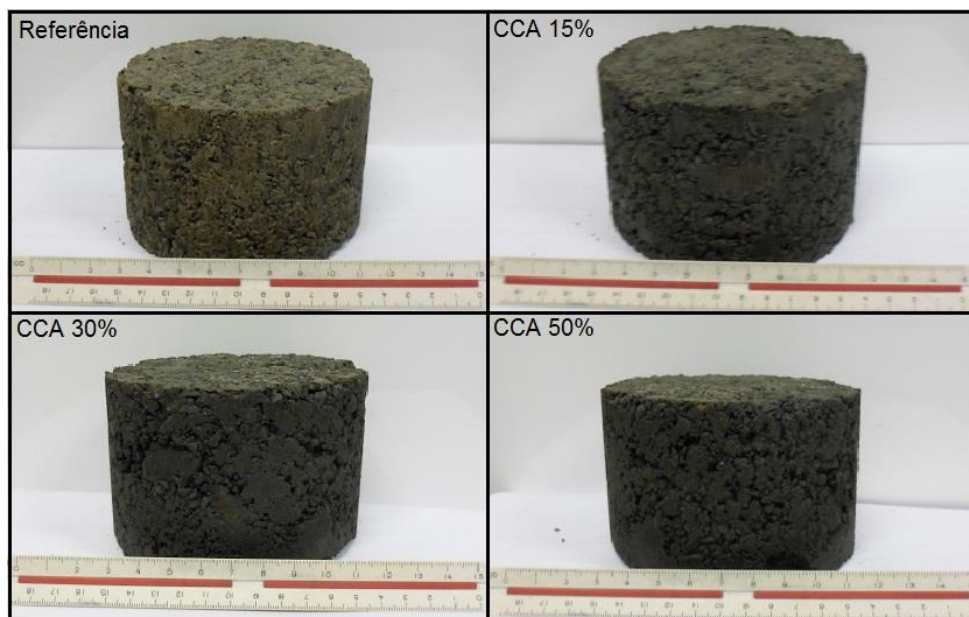


Figura 35 – Corpos de prova para ensaios de RTCD e MR

3.2 Materiais

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

3.2.1 Material fresado

Como já comentado anteriormente, o material fresado é o produto resultante do desbaste de parte do pavimento. Nesta pesquisa trabalhou-se com o fresado de revestimento asfáltico, uma vez que um dos propósitos era obter um maior conhecimento do comportamento mecânico desse material, visando sua reutilização em obras ligadas à pavimentação, e especificamente sua aplicação em camadas granulares e cimentadas.

Foram coletados materiais oriundos de duas rodovias no estado do Rio Grande do Sul que estavam em processo de manutenção:

Rodovia Federal BR-290: O material fresado utilizado na etapa laboratorial foi coletado na BR-290, pista Norte, durante o processo de manutenção do pavimento asfáltico em julho de 2012 nas proximidades do acesso a cidade de Cachoeirinha. Foram feitas 06 coletas, em pares, diretamente da esteira da máquina fresadora e enviados para o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

Rodovia Estadual ERS-509: O material fresado foi coletado na ERS-509 durante o processo de manutenção do pavimento asfáltico em outubro de 2011, nas proximidades do km 06, trecho entre Camobi e Santa Maria/RS. Cerca de 6 m³ de material foram coletados e depositados nos fundos do LMCC da UFSM.

Cada uma das amostras coletadas foi seca ao ar, quarteada e preparada para ensaios de caracterização: granulometria (DNER-ME 083/98), compactação (DNER-ME 162/94), determinação do Índice de Suporte Califórnia (DNER-ME 049/94), percentagem de betume em misturas betuminosas (DNER-ME 053/94) determinação da massa específica pela metodologia Rice (NBR 15619/2008), além de granulometria pós-extração do ligante.

A máquina fresadora utilizada em ambas as coletas foi a Caterpillar PM102 com largura de corte de 1,00m e espessura de corte de até 35 cm e considerada uma máquina de médio porte. A durabilidade dos dentes de corte (bits) é de 100 a 150 horas de trabalho e no caso desta pesquisa encontravam-se com aproximadamente 50 horas de uso. O cilindro de corte utiliza 100 dentes de corte. Nas figuras 36 a 39 seguem imagens do equipamento e do processo de coleta de amostras do material na BR-290.



Figura 36 – Máquina fresadora Caterpillar PM102



Figura 37 – Detalhe do cilindro de corte da fresadora Caterpillar PM102



Figura 38 – Vista do trecho que foi feita a fresagem



Figura 39 – Coleta de amostra diretamente da fresadora

3.2.1.1 Análise granulométrica e teor de betume

- **Material Fresado BR-290:**

A tabela 4 apresenta os valores da análise granulométrica feita com o fresado da BR-290, assim como na figura 40 onde estão plotados os resultados. As amostras foram separadas em 3 pares, devido a coleta do material ter sido realizada em diferentes pontos do trecho restaurado, e para que pudesse ser extraído o ligante asfáltico e melhor análise de variações na granulometria.

Tabela 4 – BR-290 - Distribuição granulométrica das amostras de material fresado

| Peneira | Abertura (mm) | Amostra 01 A | Amostra 01 B | Amostra 02 A | Amostra 02 B | Amostra 03 A | Amostra 03 B |
|---------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2" | 50,8 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1" | 25,4 | 96,29 | 96,85 | 92,78 | 93,78 | 96,09 | 96,34 |
| 3/4" | 19,1 | 91,83 | 93,58 | 87,88 | 90,07 | 92,59 | 92,98 |
| 1/2" | 12,7 | 79,40 | 82,09 | 73,95 | 76,55 | 84,17 | 83,54 |
| 3/8" | 9,5 | 64,63 | 66,84 | 60,32 | 62,57 | 73,89 | 71,99 |
| n 4 | 4,8 | 42,45 | 43,02 | 36,00 | 39,59 | 52,01 | 50,16 |
| n 10 | 2,0 | 22,07 | 23,25 | 16,22 | 17,77 | 30,58 | 29,16 |
| n 40 | 0,42 | 6,38 | 6,64 | 3,03 | 3,58 | 9,88 | 8,80 |
| n 80 | 0,18 | 2,56 | 2,82 | 1,01 | 1,89 | 3,80 | 3,28 |
| n 200 | 0,075 | 0,93 | 0,96 | 0,29 | 0,47 | 1,38 | 0,83 |

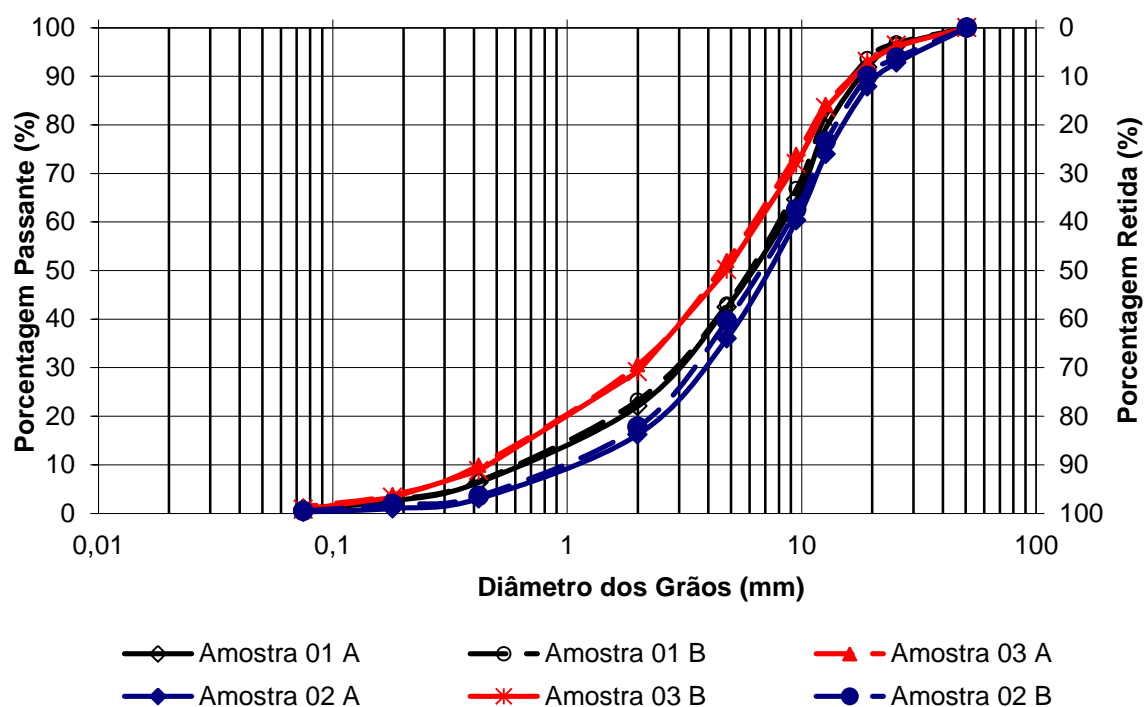


Figura 40 – BR-290 - Distribuição granulométrica do material fresado

A tabela 5 e a figura 41 apresentam os resultados da análise granulométrica realizada após a extração (AE) do ligante asfáltico do material fresado.

Tabela 5 – BR-290 - Distribuição granulométrica das amostras AE do ligante

| Peneira | Abertura (mm) | Amostra 01 A | Amostra 01 B | Amostra 02 A | Amostra 02 B | Amostra 03 A | Amostra 03 B |
|---------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1" | 25,4 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4" | 19,1 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 95,60 | 85,80 | 94,80 | 92,70 | 96,30 | 98,00 |
| 3/8" | 9,5 | 82,20 | 75,20 | 79,00 | 81,20 | 80,30 | 86,40 |
| n 4 | 4,8 | 59,90 | 51,70 | 55,10 | 57,10 | 59,20 | 61,80 |
| n 10 | 2,0 | 38,40 | 32,10 | 35,10 | 36,60 | 40,50 | 40,90 |
| n 40 | 0,42 | 15,80 | 13,20 | 16,70 | 17,50 | 19,70 | 19,60 |
| n 80 | 0,18 | 8,10 | 7,00 | 9,20 | 9,90 | 10,20 | 10,30 |
| n 200 | 0,075 | 4,00 | 3,00 | 4,60 | 4,60 | 5,10 | 6,00 |

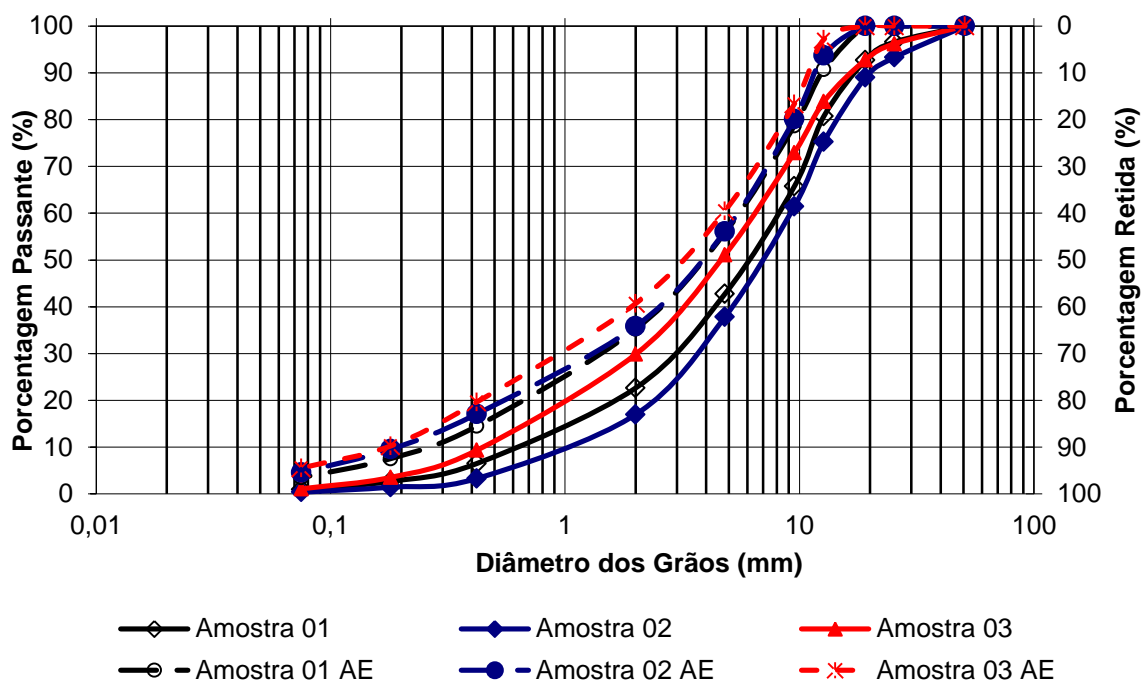


Figura 41 – BR-290 – Análise comparativa das curvas granulométricas, antes e AE do ligante

De maneira geral, é possível verificar que existe uma pequena variação entre cada amostragem, isso está relacionado ao processo de fresagem (mesmo controlado), ao traço e características do concreto asfáltico existente e ao estado da superfície. A análise comparativa das curvas antes e depois da extração (Figura 39) nos mostra, como era de se esperar que acontecesse, uma redução do tamanho dos grãos (grumos) pela desagregação causada com a ausência de ligante. A granulometria do concreto asfáltico utilizado pela Concessionária foi, historicamente, a faixa IVB do Instituto do Asfalto e a Faixa C do DNIT (DNIT 031/2006 – ES), cujos diâmetros máximos de agregados granulares são de 19 mm (3/4”), compatível com os resultados encontrados na figura 42.

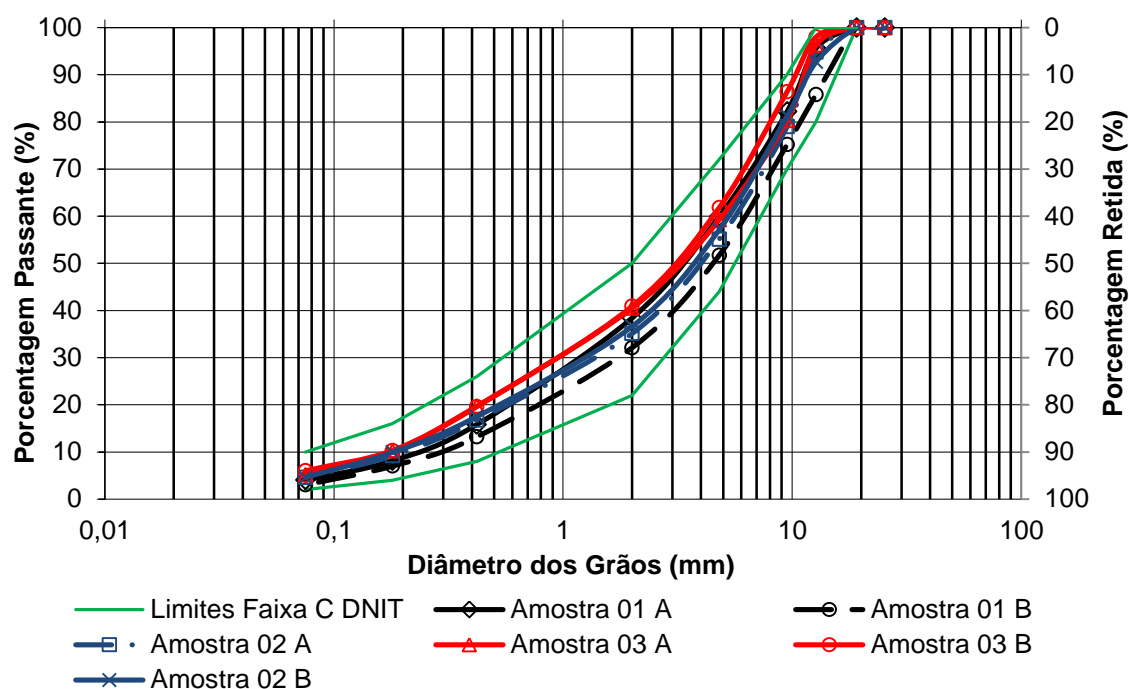


Figura 42 – BR-290 - Distribuição granulométrica do material fresado AE do ligante

A tabela 6 apresenta os resultados encontrados de teor de betume das amostras que foram feitas as análises granulométricas do material fresado. Foi encontrado o teor de betume médio das amostras, sendo este igual a 5,00%, com desvio padrão de 0,33%. O valor é bastante coerente com os projetos de concreto asfáltico.

Tabela 6 – BR-290 – Teor de betume

| Amostra | Teor (%) | Média (%) |
|--------------|----------|-----------|
| Amostra 01 A | 4,81 | 5,00 |
| Amostra 01 B | 4,73 | |
| Amostra 02 A | 4,98 | |
| Amostra 02 B | 5,01 | |
| Amostra 03 A | 4,85 | |
| Amostra 03 B | 5,64 | |

- **Material Fresado ERS-509:**

A tabela 7 apresenta os valores da análise granulométrica feita com o fresado da ERS-509, assim como na figura 43 onde estão plotados os resultados.

Tabela 7 – ERS-509 - Distribuição granulométrica das amostras de material fresado

| Peneira | Abertura (mm) | Amostra 01 | Amostra 02 | Amostra 03 |
|---------|---------------|------------|------------|------------|
| 1" | 25,4 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4" | 19,1 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 84,97 | 92,79 | 89,01 |
| 3/8" | 9,5 | 76,50 | 85,05 | 83,37 |
| n 4 | 4,8 | 47,92 | 56,65 | 58,55 |
| n 10 | 2,0 | 20,78 | 28,45 | 31,62 |
| n 40 | 0,42 | 2,48 | 4,49 | 5,36 |
| n 80 | 0,18 | 0,94 | 1,65 | 1,97 |
| n 200 | 0,075 | 0,44 | 0,59 | 0,79 |

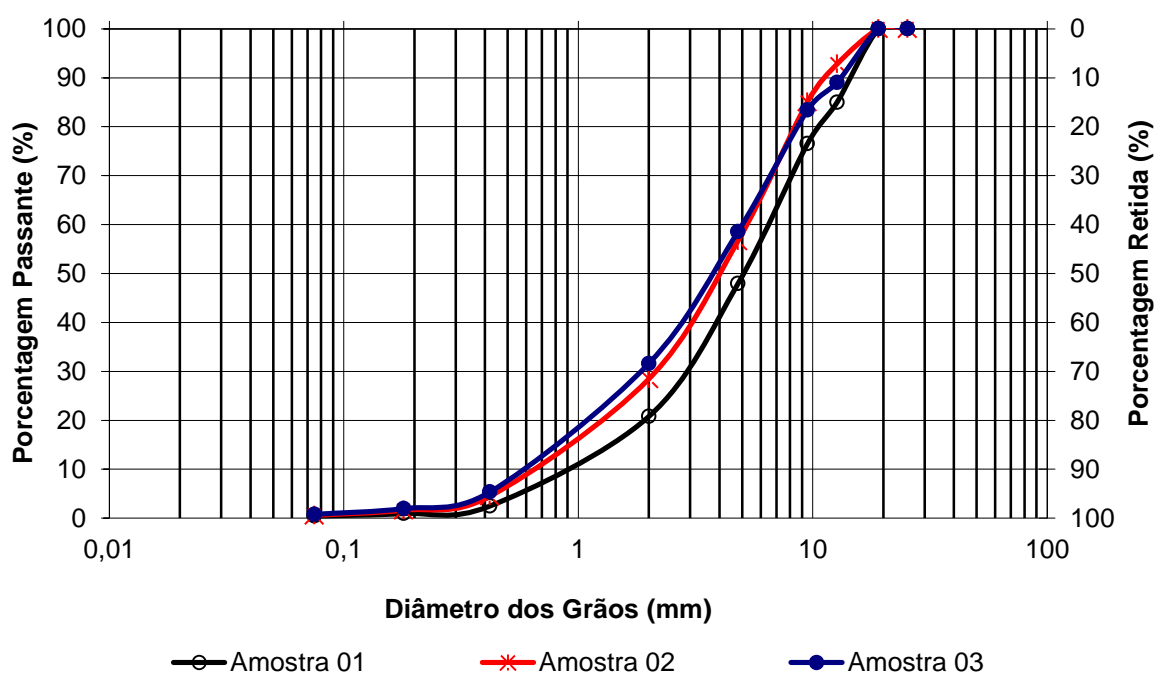


Figura 43 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do material fresado

As amostras foram separadas em 3 (três), para que pudesse ser extraído o ligante asfáltico e determinado o teor médio. O material fresado da ERS-509 utilizado na pesquisa foi passado na Peneira 3/4", a fim de descartar os grumos do material e estabilizá-lo granulometricamente. A tabela 8 e a figura 44 apresentam os resultados da análise granulométrica realizada após a extração do ligante asfáltico do material fresado.

Tabela 8 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do material fresado AE do ligante

| Peneira | Abertura (mm) | Amostra 01 AE | Amostra 02 AE | Amostra 03 AE |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1" | 25,4 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4" | 19,1 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 93,44 | 96,17 | 96,20 |
| 3/8" | 9,5 | 89,23 | 92,71 | 94,08 |
| n 4 | 4,8 | 71,28 | 77,12 | 77,89 |
| n 10 | 2,0 | 46,46 | 52,80 | 54,90 |
| n 40 | 0,42 | 19,53 | 22,70 | 22,81 |
| n 80 | 0,18 | 12,51 | 14,46 | 13,98 |
| n 200 | 0,075 | 7,53 | 7,93 | 7,52 |

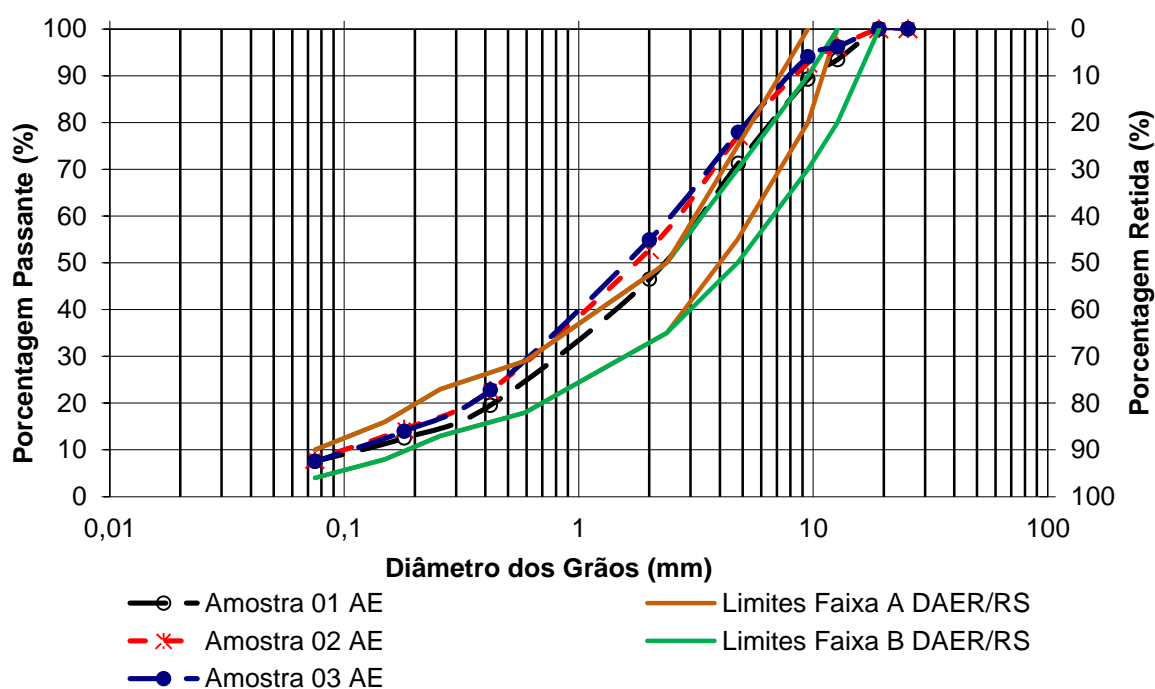


Figura 44 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do material fresado AE do ligante

Na tentativa de enquadrar o material nas faixas granulométricas de projeto especificadas pelo DAER-RS (DAER-ES-P 16/1991) para concreto asfáltico houve pequena discrepância nos valores, principalmente nos agregados com dimensões entre 0,5 e 4 mm de diâmetro. Além disso, é possível perceber que os materiais finos se encaixam nas faixas A e B do DAER, o que não ocorre quando os grãos aumentam a partir de 4 mm, passando da Faixa A para B nos agregados maiores que 10 mm de diâmetro.

Assim como aconteceu com o material da BR-290, foi possível verificar pequena variação entre as amostras, o que também pode ser relacionado ao processo de fresagem e as características e estado do material extraído da pista para restauração. Após análise entre as curvas das amostras antes e após a extração do ligante asfáltico, houve redução do tamanho dos grãos causado pela desagregação dos grumos de fresado com a ausência do ligante, como mostra a figura 45.

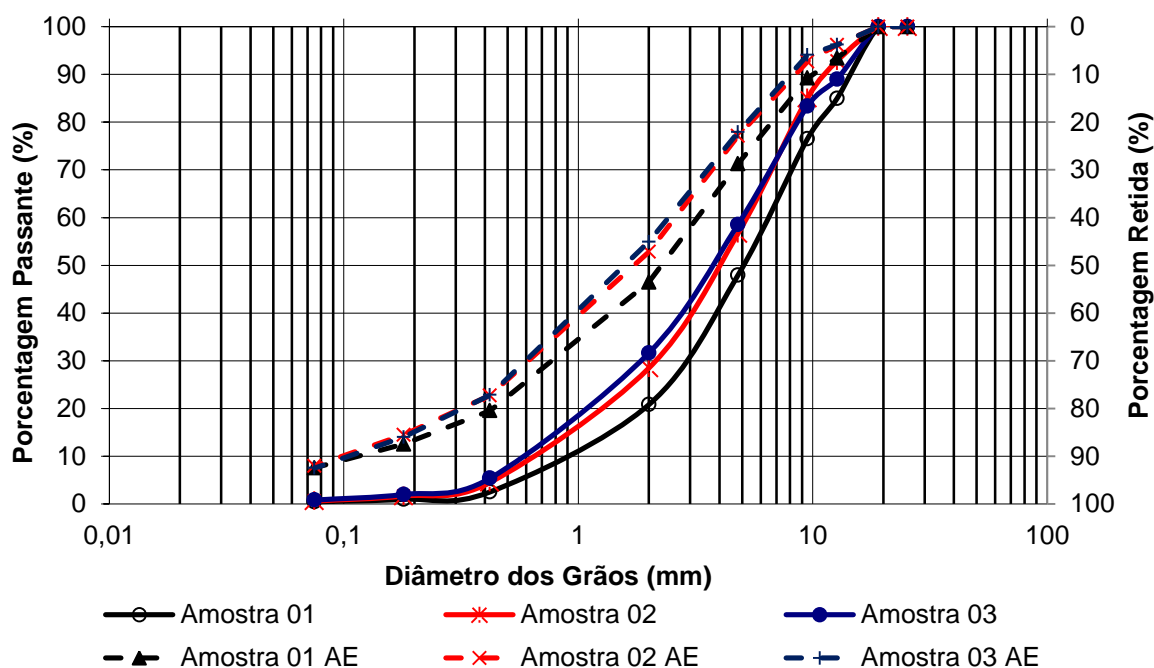


Figura 45 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do material fresado antes e AE

A tabela 9 apresenta os resultados encontrados de teor de betume das amostras onde foram feitas as análises granulométricas do material fresado.

Tabela 9 – ERS-509 – Teor de betume

| Amostra | Teor (%) | Média (%) |
|----------------|-----------------|------------------|
| Amostra 01 A | 5,47 | 6,06 |
| Amostra 01 B | 6,22 | |
| Amostra 02 A | 6,13 | |
| Amostra 02 B | 6,14 | |
| Amostra 03 A | 6,37 | |
| Amostra 03 B | 6,03 | |

Determinou-se o teor de betume médio das amostras, sendo este igual a 6,06%. O teor apresentou um grau percentual acima do valor encontrado para o material da BR-290, o que pode ser explicado pela utilização de materiais virgens de pedreiras distintas, mas não se distancia dos padrões usuais de dosagem de concreto asfáltico da região, que necessitam de maior teor de ligante devido à origem do agregado.

3.2.1.2 Massa específica – metodologia Rice

Foram determinadas a massa real dos materiais pela metodologia Rice, obtendo-se a Densidade Máxima Medida (DMM), conforme a NBR 15619/2008 – Misturas asfálticas – Determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas. Para o cálculo do DMM é utilizada a equação (1) a seguir, conforme a NBR 15619.

$$DMM = \frac{B}{(B+A-C)} \times 0,99707 \quad (1)$$

Onde:

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

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

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

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

Nota: 0,99707 refere-se à densidade da água a 25°C expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3).

A tabela 10 a seguir apresenta os resultados obtidos no ensaio, com valores em cada amostra obedecendo aos limites da norma para um mesmo material. A variação entre os materiais foi de aproximadamente 10%.

Tabela 10 – Densidade máxima medida

| Material Fresado | Amostra | A (g) | B (g) | C (g) | DMM (g/cm^3) | DMM Médio (g/cm^3) |
|------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------------|-------------------------------|
| BR-290 | 1 | 7698,00 | 1806,90 | 8784,90 | 2,502 | 2,505 |
| | 2 | 7698,00 | 1807,80 | 8787,10 | 2,508 | |
| ERS-509 | 1 | 7698,00 | 1450,00 | 8539,30 | 2,375 | 2,370 |
| | 2 | 7698,00 | 1398,60 | 8507,10 | 2,366 | |

3.2.2 Agregados

A pesquisa buscou estudar a reutilização do material fresado de revestimentos asfálticos, incorporando este em camadas granulares para pavimentos flexíveis como alternativa de projeto. A partir dessa premissa, optou-se por trabalhar com agregados naturais, britas e pó-de-pedra, para compor frações do material fresado, originando novas misturas. Sendo assim, os agregados virgens escolhidos são de larga utilização em pavimentação, e nesta pesquisa foram utilizados para estabilização granulométrica das misturas elaboradas.

Os agregados virgens utilizados nas misturas com fresado da BR-290 são provenientes da Pedreira do Consórcio Construtor TRS localizado as margens da rodovia BR-290 em Santo Antônio da Patrulha/RS. Trata-se de um agregado de

origem vulcânica largamente utilizado para execução de Macadame Seco, Brita Graduada Simples e Concreto Asfáltico.

Os agregados virgens utilizados nas misturas com fresado da ERS-509 são provenientes da Brita Pinhal localizada na Estrada Morro do Baú – BR 158, Itaara/RS, município próximo a Santa Maria/RS. Trata-se de um agregado de origem vulcânica utilizado para execução de Brita Graduada Simples, Macadame Seco, Concreto Asfáltico, Pré-misturados à frio e demais materiais granulares para utilização em pavimentação e obras civis. Apenas o pó-de-pedra foi utilizado como agregado virgem para as misturas com o material fresado da ERS-509.

Alguns ensaios de caracterização foram realizados, entre eles:

- Análise granulométrica (DNER 083/98);
- Massa específica (DNER ME 195/97);
- Absorção (DNER ME 195/97);
- Perda à abrasão Los Angeles (DNER ME 35/98);
- Índice de lamelaridade (DAER/RS – EL 108/01);
- Índice de forma (DNER ME 86/94);
- Equivalente de Areia (DNER ME 54/97), e;
- Sanidade (DNER ME 89/94).

3.2.2.1 Caracterização materiais BR-290

Os agregados virgens provenientes da Pedreira do Consórcio Construtor TRS, localizado as margens da rodovia BR-290 em Santo Antônio da Patrulha/RS, são de origem vulcânica. A tabela 11 apresenta algumas características tecnológicas dos agregados utilizados e a tabela 12 e a figura 46 as características granulométricas do material.

Tabela 11 – BR-290 - Características tecnológicas dos agregados utilizados

| Propriedade | Método | Brita 3/4" | Brita 3/8" | Pó de Pedra |
|---|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Absorção (%) | DNER ME 195/97 | 0,70 | 0,80 | - |
| Massa Específica (t/m ³) ¹ | DNER ME 195/97 | 2,831 | 2,767 | 2,810 ² |
| Índice de Lamelaridade | DAER/RS – EL 108/01 | 14,9 | 29,0 | - |
| Índice de Forma | DNER ME 86/94 | 2,19 | | - |
| Sanidade (%) | DNER ME 89/94 | 3,47 | | - |
| Equivalente de Areia (%) | DNER ME 54/97 | - | | 62,08 |
| Perda à Abrasão LA | DNER ME 35/98 | 12 | | - |

Nota: ¹ densidade efetiva – média aritmética da densidade real e aparente dos grãos;
² utilizada a técnica do picnômetro.

Tabela 12 – BR-290 - Distribuição granulométrica dos agregados virgens

| Peneira | Abertura (mm) | Brita 3/4" | Brita 3/8" | Pó de Pedra |
|----------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 2" | 50,8 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1" | 25,4 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4" | 19,1 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 58,35 | 98,90 | 100,00 |
| 3/8" | 9,5 | 11,40 | 95,25 | 100,00 |
| n 4 | 4,8 | 2,30 | 45,85 | 100,00 |
| n 10 | 2,0 | 1,70 | 1,80 | 73,35 |
| n 40 | 0,42 | 1,60 | 1,60 | 29,70 |
| n 80 | 0,18 | 1,45 | 1,30 | 19,95 |
| n 200 | 0,075 | 1,00 | 0,90 | 13,75 |

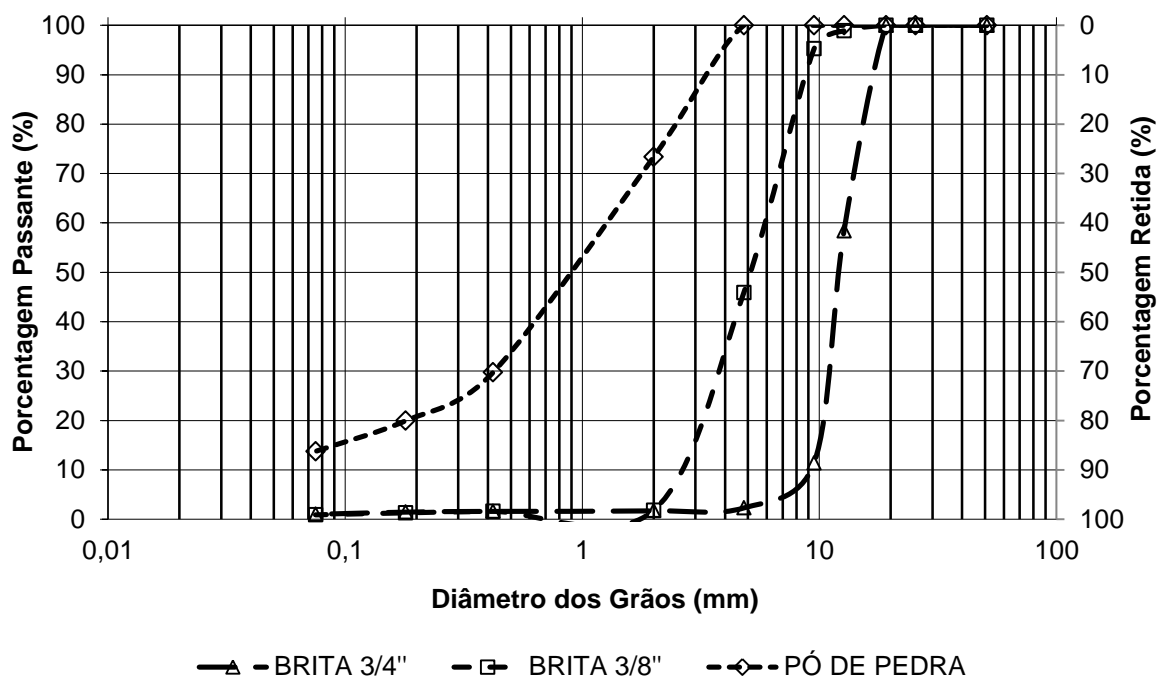


Figura 46 – BR-290 - Distribuição granulométrica dos agregados virgens

3.2.2.2 Caracterização materiais ERS-509

Os agregados virgens utilizados nas misturas ERS-509 são provenientes da Brita Pinhal localizada na Estrada Morro do Baú – BR 158, Itaara/RS, município próximo a Santa Maria/RS. A tabela 13 apresenta algumas características tecnológicas dos agregados utilizados e a tabela 14 e a figura 47 as características granulométricas do material.

Tabela 13 – ERS-509 - Características tecnológicas dos agregados utilizados

| Propriedade | Método | Pó de Pedra |
|--------------------------------------|----------------|-------------|
| Absorção (%) | DNER ME 195/97 | 4,07 |
| Massa Específica (t/m ³) | DNER ME 84/95 | 2,661 |
| Equivalente de Areia (%) | DNER ME 54/97 | 81,7 |

Tabela 14 – ERS-509 - Distribuição granulométrica dos agregados virgens

| Peneira | Abertura (mm) | Pó de Pedra |
|---------|---------------|-------------|
| 1" | 25,4 | 100 |
| 3/4" | 19,1 | 100 |
| 1/2" | 12,7 | 100 |
| 3/8" | 9,5 | 100 |
| n 4 | 4,8 | 97,4 |
| n 10 | 2,0 | 53,8 |
| n 40 | 0,42 | 21,5 |
| n 80 | 0,18 | 14,2 |
| n 200 | 0,075 | 9,3 |

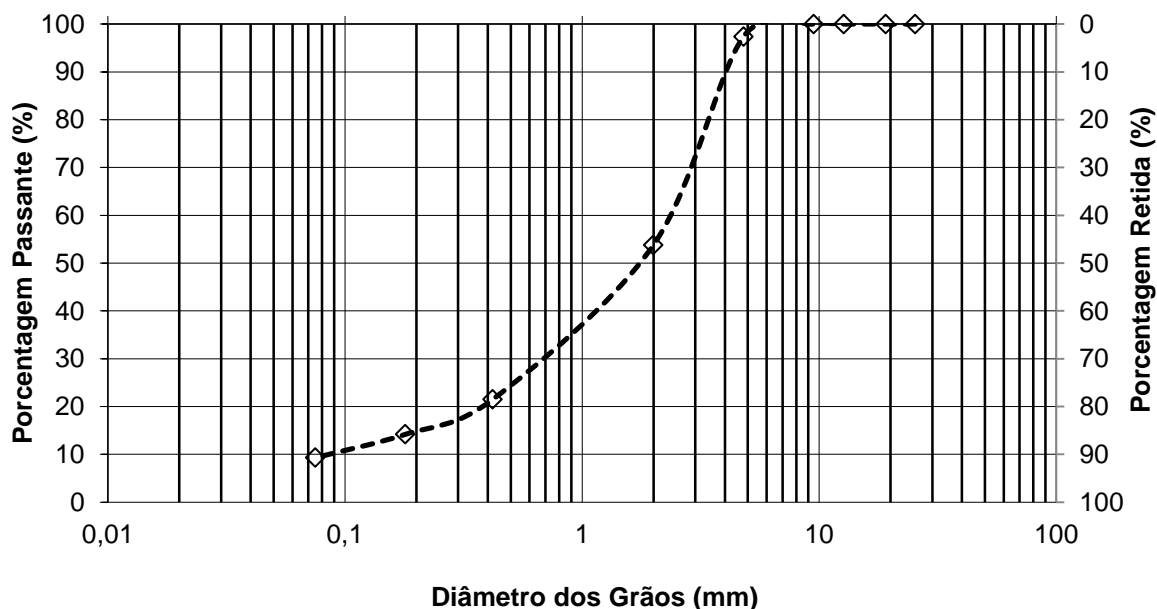


Figura 47 – ERS-509 - Distribuição granulométrica do pó-de-pedra

3.2.3 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP IV-32 - Cimento Portland Pozolânico produzido pela CCP – Cimpor Cimentos do Brasil na unidade de Candiota/RS. Sua composição é de silicatos de cálcio, aluminatos e ferro aluminatos, sulfato de cálcio,

material carbonático e pozolana. A utilização do cimento nesta pesquisa foi determinada para que pudesse ser realizada estabilização química das misturas, com o uso de diferentes teores na mistura estabilizada granulometricamente.

Segundo a NBR 5736/1991 – *Cimento Portland pozolânico*, o cimento é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura de clínquer Portland e materiais pozolânicos. Os materiais pozolânicos, não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a compostos com propriedades aglomerantes. Uma vantagem do uso deste cimento é a redução do calor de hidratação e o aumento da resistência em idades avançadas.

O cimento Portland pozolânico tem baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. Além disso, o alto teor de pozolana, entre 15 e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento (NBR 5736/1991).

A tabela 15 apresenta os teores dos componentes pozolânicos de acordo com a NBR 5736/1991. A tabela 16 na sequência apresenta as características físicas do cimento utilizado na pesquisa, bem como os limites exigidos pela norma.

Tabela 15 – Teores dos componentes do cimento Portland pozolânico

| Sigla | Classe de resistência | Componentes (% em massa) | | |
|-------|-----------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|
| | | Clínquer sulfato de cálcio | Material pozolânico | Material carbonático |
| CP IV | 32 | 84 - 85 | 15 - 50 | 0 - 5 |

Fonte: NBR 5736/1991.

Tabela 16 – Características físicas do Cimento CP IV – 32 utilizado na pesquisa

| Grandeza Física | | Resultado | Limites NBR 5736 |
|---------------------------------------|---|-----------|------------------|
| Finura #200 (%) | | 2,42 | < 8,0 |
| Finura Blaine (cm ² /g) | | 3599 ± 36 | |
| Massa específica (g/cm ³) | | 2,74 | |
| Início de pega (min) | | 90 | > 60 |
| Fim de pega (min) | | 180 | |
| Resistência Argamassa (MPa) | 3 dias | 21,49 | > 10,0 |
| | 7 dias | 25,82 | > 20,0 |
| | 28 dias | 33,57 | 32,0 - 49,0 |
| Dimensões características (µm) | Diâmetro médio | 7,27 | |
| | Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas | 0,93 | |
| | Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas | 21,56 | |
| | Diâmetro correspondente a 63,2% de partículas passantes | 9,90 | |

As características físicas do cimento utilizado obedeceram aos limites da NBR 5736, que impõe limites nos itens de finura na #200, início de pega e resistência da argamassa para 3, 7 e 28 dias de cura úmida. A figura 48 a seguir apresenta a distribuição granulométrica do cimento obtida por meio do analisador de partículas por difração a *laser*, realizado no laboratório da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

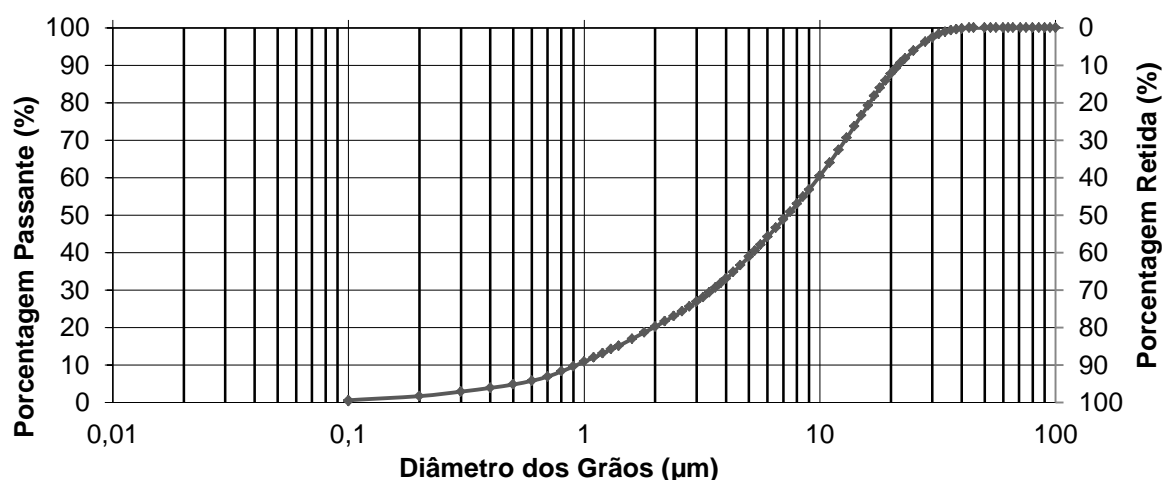


Figura 48 – Distribuição granulométrica do Cimento CP IV – 32

Em relação ao desempenho de cimentos, com base exclusivamente na distribuição granulométrica, são desejáveis volumes de partículas de 3 a 30 μm entre 60 e 70%. Partículas abaixo de 2 μm de diâmetro pouco influenciam para o aumento de resistência. Por outro lado, partículas maiores que 50 μm comportam-se praticamente como inertes.

A tabela 17 apresenta os valores obtidos para as amostras analisadas, com resultados satisfatórios para o material utilizado, a tabela 18 apresenta os resultados de análise química por espectrometria de raios X, realizada no laboratório da ABCP.

Tabela 17 – Distribuição granulométrica por faixa

| Resultados (%) | | |
|-------------------|----------------------|--------------------|
| < 2 μm | 3 a 30 μm | > 50 μm |
| 20,2 | 70,52 | 0 |

Tabela 18 – Características químicas do Cimento CP IV – 32

| Ensaio | Resultados % em massa | Limites da NBR 5736/91 |
|---|--------------------------|---------------------------|
| Perda ao fogo - PF | 7,00 | < 4,50% |
| Dióxido de silício total - SiO_2 | 32,61 | – |
| Óxido de alumínio - Al_2O_3 | 8,79 | – |
| Óxido de ferro - Fe_2O_3 | 4,34 | – |
| Óxido de cálcio total - CaO | 38,12 | – |
| Óxido de magnésio - MgO | 5,04 | < 6,50% |
| Anidrido sulfúrico - SO_3 | 1,97 | < 4,00% |
| Óxido de sódio - Na_2O | 0,20 | – |
| Óxido de potássio - K_2O | 1,39 | – |
| Óxido de titânio - TiO_2 | 0,41 | – |
| Óxido de estrôncio - SrO | 0,04 | – |
| Pentóxido de fósforo - P_2O_5 | 0,10 | – |
| Óxido de manganês - Mn_2O_3 | 0,10 | – |
| Óxido de cálcio livre - CaO (livre) | 1,93 | – |
| Resíduo insolúvel - RI | 34,27 | – |
| Anidrido carbônico - CO_2 | 4,89 | < 3,00% |
| Equivalente alcalino em Na_2O ($0,658 \times \text{K}_2\text{O}\% + \text{Na}_2\text{O}\%$) | 1,11 | – |

A Perda ao fogo superou o limite máximo permitido por norma de 4,5%, ficando em 7,0%, assim como o teor de Anidrido carbônico que foi de 4,89% em massa, sendo o limite de 3,0%. O ensaio de determinação de perda ao fogo exprime a diminuição de massa do cimento após aquecimento a 950°C. A maior parte desse valor é referente ao dióxido de carbono (CO₂) e, a outra parte, à água evaporada do gesso. Resultados elevados de Perda ao fogo podem ocorrer devido ao teor elevado e Anidrido carbônico. Os demais limites exigidos pela norma, referentes a teor de Óxido de Magnésio e Anidrido sulfúrico estão de acordo com as instruções normativas da NBR 5736.

3.2.4 Cinza de casca de arroz (CCA)

A CCA utilizada é proveniente da empresa EKOSIL, que trabalha com o aproveitamento da casca do arroz e tem como foco a sustentabilidade. Está no mercado desde 2005, possui duas unidades de produção da CCA, uma na cidade de Itaqui – RS e a outra na cidade de São Borja – RS. O material utilizado na pesquisa é oriundo da unidade de Itaqui – RS, com queima controlada entre 600°C e 800°C e controle do teor de carbono entre 5% e 8%.

A CCA é um produto derivado da calcinação controlada e constante da casca de arroz em termoelétricas, com posterior industrialização. Seu composto tem até 95% de Dióxido de Silício (SiO₂) com baixa quantidade de carbono e traços de metais. É um produto renovável que pode ser aplicado em compostos de borracha, plástico e concreto.

A utilização da CCA, da mesma forma como o material fresado, carrega o apelo ambiental consigo, pelo reaproveitamento dos materiais. A CCA, sendo um material pozolânico, foi escolhida para que fossem realizadas substituições do cimento Portland das misturas, afim de que se pudesse diminuir o consumo deste cimento em possíveis aplicações em pavimentação. Visando sempre os benefícios que a CCA traz ao meio ambiente, aliados a boa técnica de engenharia.

Nesta pesquisa a CCA utilizada é moída, apresentando 2 (duas) finuras que são comercializadas pela EKOSIL, sendo então denominadas CCA #325 e CCA #500. A tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física da

CCA utilizada, realizados no LMCC da UFSM. A massa específica se mostrou muito semelhante, o que pode provar que o material CCA #500 apenas passou por processo de moagem mais tempo que a CCA #325, resultados em maiores áreas específicas na finura Blaine e finura na peneira nº 200.

Tabela 19 – Características físicas da CCA

| Grandeza Física | CCA #325 | CCA #500 |
|---------------------------------------|----------|-------------|
| Finura #200 (%) | 0,1 | 0,08 |
| Finura Blaine (cm ² /g) | 4238 ±42 | 4728,55 ±47 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,086 | 2,083 |

Na figura 49 é apresentado o difratograma de raios X da CCA, realizado no LMMM – Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos da UFSM. Observa-se que a cinza apresenta comportamento de um material cristalino por apresentar picos finos no ensaio, típico da presença de cristais no material. Este ensaio mostra que a queima da casca de arroz natural pode não ter sido realizada com controle adequado de temperatura.

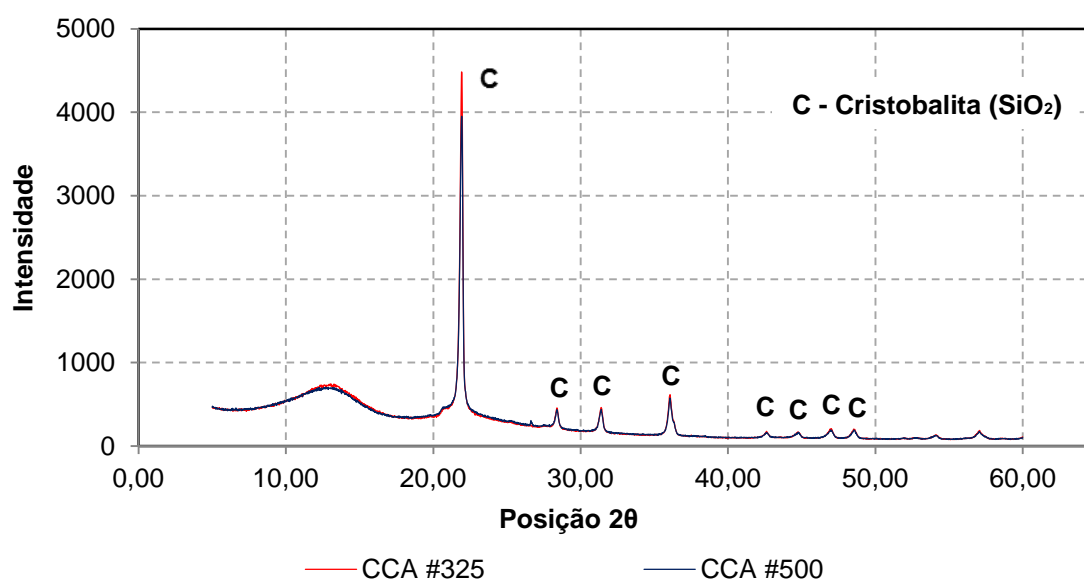


Figura 49 – Difratograma CCA

Para que ocorra a formação de cristais são exigidas temperaturas acima de 800°C, para então o sódio e o potássio presentes na composição da cinza acelerar a fusão das partículas e a cristalização da cristobalita (SiO_2) a partir da sílica amorfa diminuir o ponto de fusão do material. Logo, para que haja a possibilidade de cristalização das partículas, a CCA deve ter sido submetida a temperaturas elevadas de queima.

3.2.5 Água

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

3.3 Procedimentos

3.3.1 Compactação

A compactação é um método de estabilização de solos que se dá por aplicação de alguma forma de energia mecânica (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Seu efeito confere ao solo/agregado um aumento de sua massa específica aparente seca e redução de vazios, conseqüentemente um aumento na resistência ao cisalhamento e redução da permeabilidade e compressibilidade.

No caso desta pesquisa foi utilizada a Energia Modificada, conforme é prática para materiais granulares no Estado do Rio Grande do Sul, e segue os preceitos da norma DNER ME 162/94 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. A compactação foi realizada para as misturas estabilizadas granulometricamente (Figura 50) e para o material fresado puro, ambos para os materiais da BR-290 e ERS-509.



Figura 50 – Mistura estabilizada granulometricamente em ensaio de compactação

3.3.2 Índice de Suporte Califórnia - ISC

A capacidade de suporte de um solo compactado pode ser medida através do método do índice de suporte, que fornece o “Índice de Suporte Califórnia - ISC” (California Bearing Ratio - CBR), idealizado pelo engenheiro O. J. Porter, em 1939, no estado da Califórnia – USA. Trata-se de um método de ensaio empírico, adotado por grande parcela de órgãos rodoviários no Brasil e no mundo. O objetivo do ensaio é determinar a força de um pistão para penetrar, sob condições controladas, em uma amostra que foi submetida a um processo de imersão por 96 horas. O valor obtido é normalizado em função do ISC de uma brita de referência cujo valor é 100%.

Assim como no ensaio de compactação, este ensaio foi realizado para as misturas estabilizadas granulometricamente (Figura 51) e para o material fresado puro, ambos para os materiais da BR-290 e ERS-509. Este ensaio segue os preceitos da norma DNER ME 049/94 – Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas, sendo a base do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis vigente no Brasil.



Figura 51 – Relato fotográfico no ensaio de determinação do ISC em mistura estabilizada granulometricamente

3.3.3 Resistência à compressão Simples (RCS)

A Resistência à compressão Simples (RCS) ou resistência à compressão não-confinada é largamente utilizada para dosagem e controle de qualidade de concreto de cimento Portland e de solo-cimento. Após um determinado tempo de cura as amostras de 10 x 20 cm são submetidas a um esforço de compressão até sua ruptura (Figura 52). A velocidade de carregamento para este ensaio foi de aproximadamente 0,43 mm/s.

A norma utilizada como base nesta pesquisa foi a DNER – ME 180/1994 – Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – Determinação da resistência à compressão simples. Os resultados da ruptura dos corpos de prova passam pela equação 2 para determinar a resistência à compressão:

$$R_{cs} = \frac{4.F}{100.\pi.d^2} \quad (2)$$

Onde:

R_{cs} : Resistência à Compressão Simples (MPa);

F : carga de ruptura (N);

d : diâmetro do corpo de prova (cm).



Figura 52 – Ensaio de compressão simples

Além da norma DNER – ME 180/1994, também foram adotados nesta pesquisa alguns parâmetros das normas de BGTC – Brita graduada tratada com cimento, por utilizar o ensaio de RCS para estabilização química. São elas, NBR 11803/2013 - Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento – Requisitos e a NBR 12261/2013 - Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento.

3.3.4 Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

A norma utilizada como base para execução deste ensaio foi a DNIT – ME 136/210 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência

à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Esta norma determina que o molde cilíndrico a ser utilizado tenha 10 cm de diâmetro interno e 6,3 cm de altura, com altura mínima da amostra de 3,5 cm. O corpo de prova destinado ao ensaio pode ser obtido diretamente na pista ou moldado em laboratório na prensa Marshall, sendo esta última utilizada nesta pesquisa. A figura 53 apresenta um corpo de prova sendo ensaiado em prensa mecânica. Os resultados da ruptura dos corpos de prova passam pela equação 3 para determinar a resistência à tração:

$$R_{cd} = \frac{2.F}{100.\pi.d.h} \quad (3)$$

Onde:

R_{cd}: Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa);

F: carga de ruptura (N);

d: diâmetro do corpo de prova (cm);

h: altura do corpo de prova (cm).



Figura 53 – Ensaio de tração por compressão diametral

3.3.5 Módulo de resiliência (MR)

Para Huang (1993) o módulo de resiliência é o módulo de elasticidade para ser usado com a teoria da elasticidade. O autor dá uma explicação sobre esse assunto, onde a maioria dos materiais de pavimentação não possuem características elásticas, mas apresentam alguma deformação permanente depois de cada aplicação de carga. No entanto, se a carga for pequena em comparação com a resistência do material, e for repetida para um grande número de vezes, a deformação sob a carga de cada repetição é quase completamente recuperável e proporcional à carga, podendo ser considerado elástico.

O método de dimensionamento de pavimentos norte-americano estabelecido pela AASHTO na versão de 1986 substituiu o ISC pelo MR do subleito na expressão do dimensionamento e também considerou esse parâmetro no cálculo dos coeficientes estruturais dos materiais asfálticos. Com isso, o MR foi reconhecido como de grande importância no dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos. A recomendação de substituir o ISC e outros valores de resistência de materiais pelo MR foi baseada nas seguintes razões (Bernucci et al., 2008):

- O MR indica uma propriedade básica do material que pode ser utilizada na análise mecânica de sistemas de múltiplas camadas;
- O MR é um método aceito internacionalmente para caracterizar materiais para o projeto de pavimentos e para sua avaliação de desempenho;
- Há técnicas disponíveis para estimar o MR em campo com testes rápidos e não-destrutivos, o que facilita a uniformização entre os procedimentos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

O esquema apresentado na figura 54 mostra sucintamente como proceder para determinação do MR, partindo dos materiais de estudo e ensaios disponíveis. Materiais granulares, como as britas, e solos devem ser analisados por ensaios triaxiais, e complementados com resultados do ISC. Já os materiais asfálticos e cimentados, analisados nesta pesquisa, são utilizados ensaios diametrais que determinam o MR pelo método de tensões indiretas.

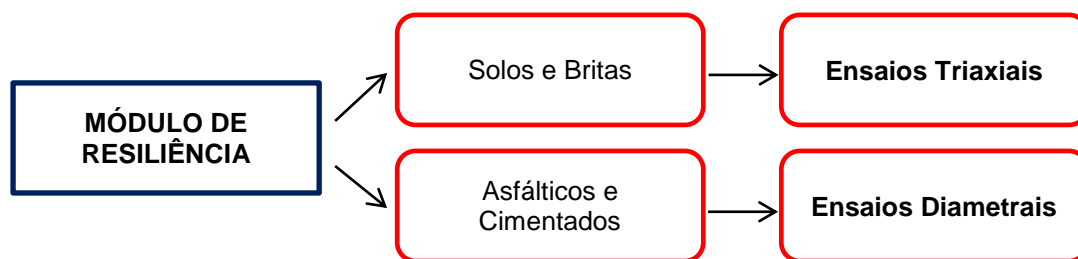


Figura 54 – Esquema de materiais e ensaios de determinação do MR.

O MR é a relação entre a tensão de tração aplicada (σ) repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável (ϵ) correspondente à tensão aplicada. Os ensaios foram realizados no LMCC da UFSM, figura 55, e no Laboratório de Pavimentação (LPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Ambos os equipamentos apresentam resultados de MR total, onde o cálculo é realizado a partir da deformação total medida no ensaio.

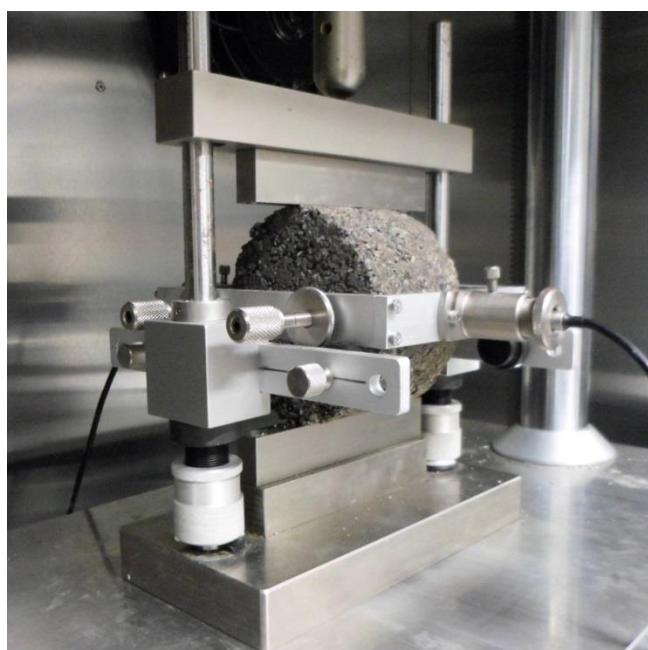


Figura 55 – Ensaio para determinação do módulo de resiliência

A norma da *American Society For Testing and Materials*, ASTM D4123: *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*, é a utilizada na configuração dos equipamentos dos laboratórios citados acima.

Antes de iniciar a medição do deslocamento, aplica-se uma sequência de carregamentos dinâmicos com a finalidade de eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio e de reduzir o efeito do histórico de tensões no valor do MR. A aplicação da carga é semi-senoidal para se aproximar da forma de carregamento da passagem de um pneu. A frequência das cargas repetidas é de 1Hz (60 ciclos por minuto) e a duração é de cerca de 0,10 segundo, com 0,9 segundo em repouso. Como a carga aplicada é geralmente pequena, o ensaio de MR é um ensaio não destrutivo e as mesmas amostras podem ser usadas para muitos testes de carga sob diferentes condições ambientais (HUANG, 1993).

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Estabilização mecânica e granulométrica

A estabilização mecânica nesta pesquisa, ao realizar ensaios de compactação e ISC com os materiais fresados na sua forma natural de extração do pavimento, foram testados para obtermos parâmetros de resistência. Os resultados desta etapa serão apresentados no decorrer deste capítulo, juntamente com os resultados das misturas estabilizadas granulometricamente.

A dosagem da mistura ou estabilização granulométrica consiste em fracionar os agregados disponíveis de maneira a atender alguma especificação, neste caso a especificação de base estabilizada granulometricamente do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT 141/2010 – ES. A referida especificação de serviço recomenda o uso de seis faixas granulométricas (A, B, C, D, E e F), sendo que as duas últimas são indicadas para tráfego com valor de N abaixo de 5×10^6 , conforme a tabela 20.

Tabela 20 – Especificação granulométrica para bases estabilizadas - DNIT 141/2010

| Faixas de Projeto | N ≤ 5 x 10 ⁶ | | | | | | Tolerância da Faixa de Projeto |
|-------------------|-------------------------|---------|---------|----------|--------------------|----------|--------------------------------|
| | N > 5 x 10 ⁶ | | | | E | F | |
| Peneiras | A | B | C | D | % em peso passando | | |
| 2" | 100 | 100 | - | - | - | - | ± 7 |
| 1" | - | 75 - 90 | 100 | 100 | - | - | ± 7 |
| 3/8" | 30 - 65 | 40 - 75 | 50 - 85 | 60 - 100 | 100 | 100 | ± 7 |
| n 4 | 25 - 55 | 30 - 60 | 35 - 65 | 50 - 85 | 55 - 100 | 70 - 100 | ± 5 |
| n 10 | 15 - 40 | 20 - 45 | 25 - 50 | 40 - 70 | 40 - 100 | 55 - 100 | ± 5 |
| n 40 | 8 - 20 | 15 - 30 | 15 - 30 | 25 - 45 | 20 - 50 | 30 - 70 | ± 2 |
| n 200 | 2 - 8 | 5 - 15 | 5 - 15 | 10 - 25 | 6 - 20 | 8 - 25 | ± 2 |

Fonte: DNIT 141/2010.

A partir da especificação e dos materiais disponíveis (fresado, britas e pó de pedra), inúmeras tentativas foram feitas para enquadrar as misturas em uma das faixas granulométricas do DNIT. Saliendo também que as faixas E e F toleram materiais mais finos e pressupõe um desempenho inferior, tendendo-se a serem evitadas. Outro aspecto é a quantidade de material virgem adicionado, quantidades muito elevadas de brita e pó de pedra tendem a elevar o custo da mistura, pelo custo do insumo e distância de transporte, além de não ser interessante do ponto de vista ambiental.

Outro fator interessante tratado na pesquisa se refere à NBR 11803/2013 – Materiais de base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento. Esta norma fora utilizada para comparação de distribuição granulométrica das misturas estabilizadas. Lembrando que as graduações do DNIT servem de parâmetro principal. A tabela 21 apresenta os limites das faixas para Brita graduada tratada com cimento – BGTC.

Tabela 21 – Especificação granulométrica BGTC – NBR 11803/2013

| Faixas de Projeto | A | B |
|--------------------------|--------------------|----------|
| Peneiras | % em peso passando | |
| 2" | 100 | - |
| 1 1/2" | 90 - 100 | - |
| 1" | - | 100 |
| 3/4" | 50 - 85 | 90 - 100 |
| 3/8" | 34 - 60 | 80 - 100 |
| n 4 | 25 - 45 | 35 - 55 |
| n 40 | 8 - 22 | 8 - 25 |
| n 200 | 2 - 9 | 2 - 9 |

4.1.1 Estabilização granulométrica – BR-290

Ao realizar o procedimento de enquadrar a mistura em faixa granulométrica do DNIT, ficou estabelecida a proporção de 70% de material fresado e 30% de

agregado virgem. A faixa da mistura ficou dentro dos limites da Faixa A do DNIT, sendo o material virgem utilizado em 15% de brita 3/4" e 15% de pó de pedra.

Esta proporção chamada de 70/30 conjuga de maneira satisfatória a questão técnica e econômica. Ao utilizar grande proporção de material fresado reciclado, fortalece o apelo ambiental e econômico. Com a utilização do material virgem foi possível manter a questão técnica ao estabelecer a mistura dentro da Faixa A. A tabela 22 e a figura 56 apresentam os resultados obtidos com a mistura 70/30.

Tabela 22 – BR-290 - Projeto de estabilização granulométrica

| Peneira | Abertura (mm) | Limites Faixa A | | Centro faixa | Faixa trabalho | | Mistura |
|---------|---------------|-----------------|-------|--------------|----------------|-------|---------|
| 2" | 50,8 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/8" | 9,5 | 30,0 | 65,0 | 47,5 | 55,5 | 65,0 | 62,5 |
| n 4 | 4,8 | 25,0 | 55,0 | 40,0 | 40,8 | 50,8 | 45,8 |
| n 10 | 2,0 | 15,0 | 40,0 | 27,5 | 23,5 | 33,5 | 28,5 |
| n 40 | 0,42 | 8,0 | 20,0 | 14,0 | 8,0 | 11,2 | 9,2 |
| n 200 | 0,075 | 2,0 | 8,0 | 5,0 | 2,0 | 3,5 | 1,5 |

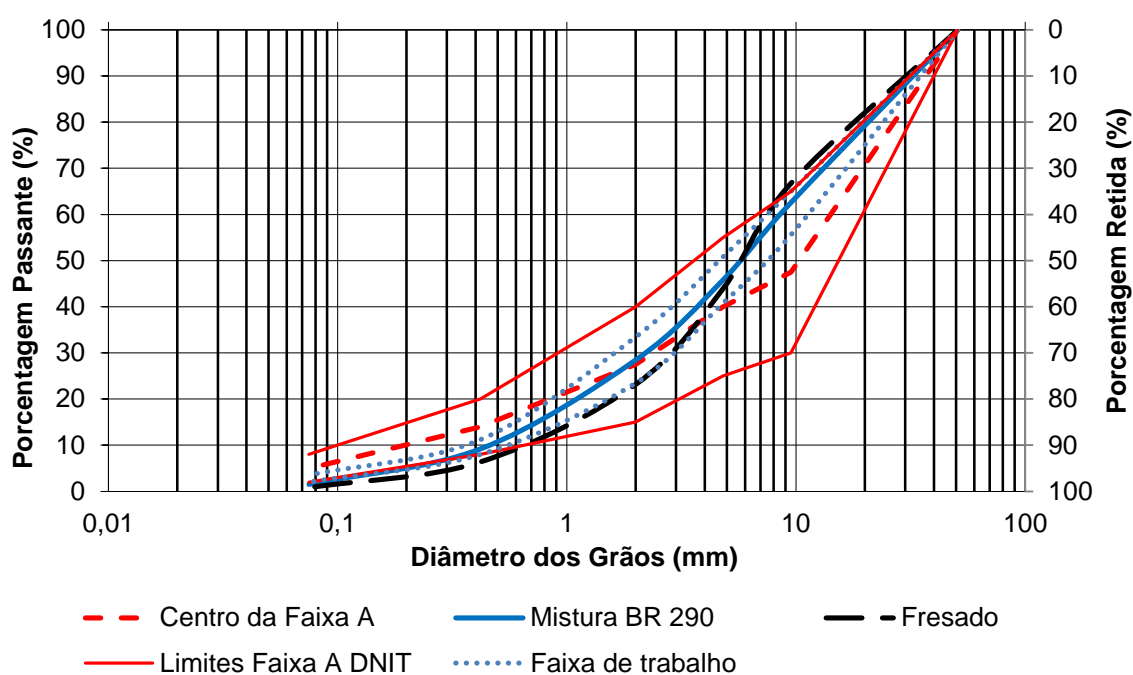


Figura 56 – BR-290 - Projeto de estabilização granulométrica

Outro fato que pode ser observado na figura 54 é que o material fresado tem uma distribuição granulométrica média muito próxima da faixa A do DNIT, e vale lembrar que durante o processo de compactação pode haver quebra de material fresado, podendo ocasionar pequenas alterações na curva da mistura.

Conforme pode ser visualizado na figura 57, a mistura estabilizada granulometricamente ficou muito próxima dos limites da graduação A para BGTC, NBR 11803/2013. Isso mostra que esta mistura também poderia ser enquadrada como BGTC ao adicionarmos o cimento como estabilizante químico, caso fossem realizados pequenos ajustes. A única ressalva que se faz é que a NBR 11803 solicita que a diferença entre as porcentagens passantes nas peneiras nº4 e nº40 deve estar compreendida entre 20% e 30%, o que não ocorre na mistura, ficando em 36,6%.

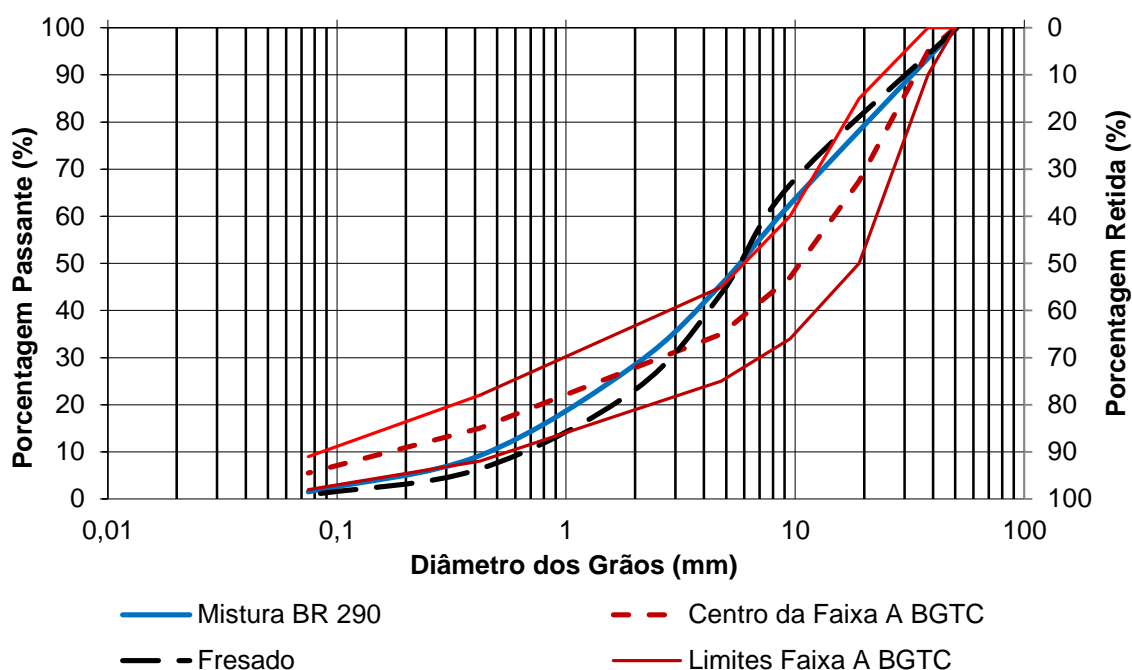


Figura 57 – BR-290 – Estabilização granulométrica e limites BGTC

4.1.2 Estabilização granulométrica – ERS-509

Para a mistura com material fresado oriundo da ERS-509 também ficou estabelecida a proporção de 70% de material fresado e 30% de agregado virgem. A faixa da mistura ficou dentro dos limites da Faixa C do DNIT para base estabilizada granulometricamente, sendo o material virgem utilizado em 30% de pó de pedra. A tabela 23 e a figura 58 apresentam os resultados obtidos com a mistura 70/30.

Tabela 23 – ERS-509 - Projeto de estabilização granulométrica

| Peneira | Abertura (mm) | Limites Faixa C | | Centro faixa | Faixa trabalho | | Mistura |
|---------|---------------|-----------------|-----|--------------|----------------|-------|---------|
| 3/4" | 19,5 | 100 | 100 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 |
| 3/8" | 9,5 | 50 | 85 | 67,5 | 65,0 | 79,0 | 72 |
| n 4 | 4,8 | 35 | 65 | 50,0 | 53,4 | 63,4 | 58,4 |
| n 10 | 2,0 | 25 | 50 | 37,5 | 29,1 | 39,1 | 34,1 |
| n 40 | 0,42 | 15 | 30 | 22,5 | 15,0 | 16,8 | 14,8 |
| n 200 | 0,075 | 5 | 15 | 10,0 | 5,0 | 6,5 | 4,5 |

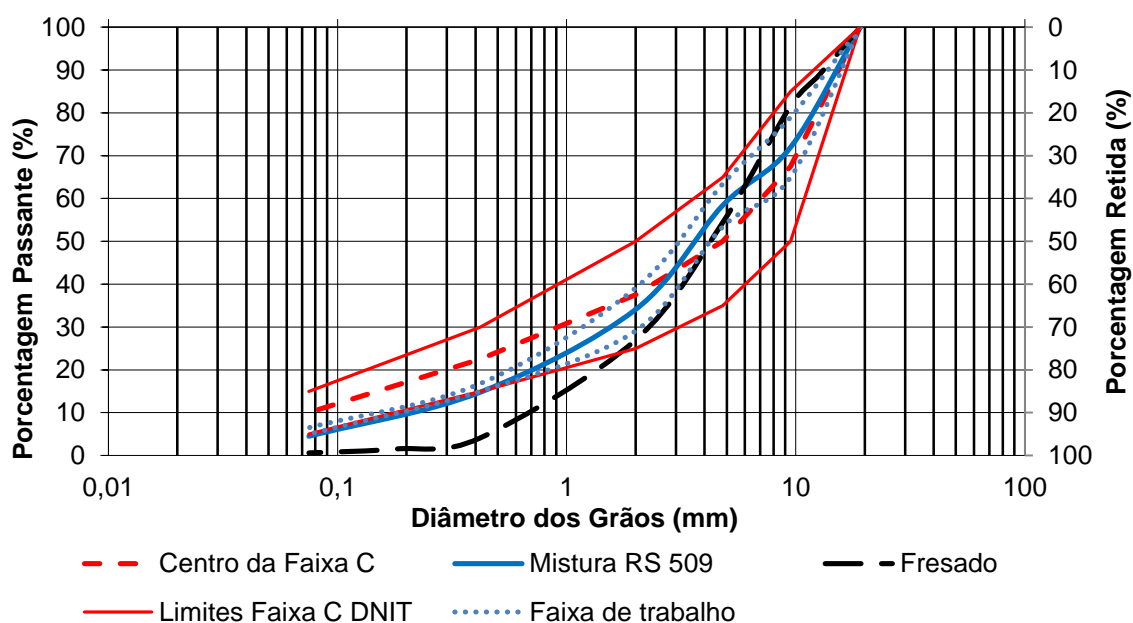


Figura 58 – ERS-509 - Projeto de estabilização granulométrica

A granulometria original do material fresado da ERS-509 apresentava deficiência na quantidade de finos, em consequência disso se mostrou eficaz a adição do pó de pedra para estabilização. Sendo assim, a maior quantidade de finos da mistura é composta por material virgem, ficando o material fresado com toda parte da porção retida nas peneiras 3/8" e 4. Desta forma foi possível estabelecer a mistura dentro dos limites da Faixa C do DNIT, com quantidade suficiente de finos.

Conforme pode ser visualizado na figura 59 a seguir, a mistura estabilizada não obedece alguns limites da Faixa B para BGTC, NBR 11803. Os agregados com diâmetro de 4 mm ficam acima do limite superior, e a fração compreendida dos agregados entre 8 e 15 mm ficam abaixo do limite inferior da faixa. Ao analisarmos a faixa é possível perceber que a mistura ultrapassa os limites na faixa estreita da graduação, compreendida pelas peneiras 4 e 3/8", o que dificulta enquadrar a mistura neste tipo de material. Também é interessante lembrar que são fornecidas apenas duas faixas granulométricas para BGTC.

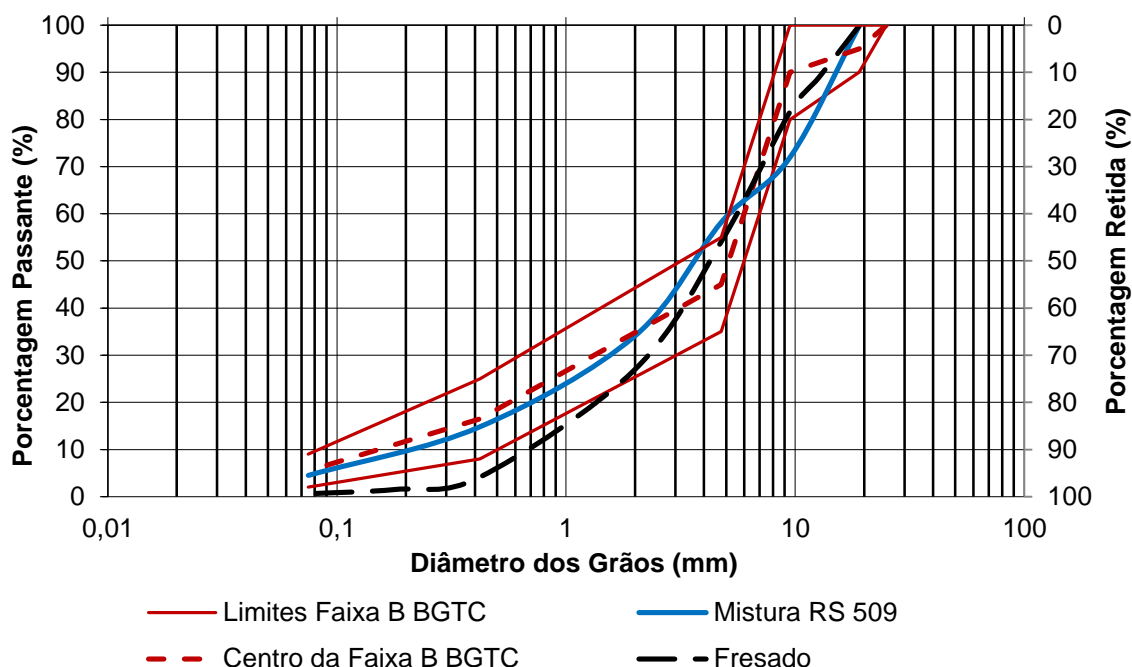


Figura 59 – ERS-509 – Estabilização granulométrica e limites BGTC

Uma análise importante que diz respeito a ambas as misturas estabilizadas granulometricamente é a questão da reprodução destes resultados em campo. Uma vez que a forma de compactação em campo é por energia mecânica, há uma tendência de quebra do material fresado, principalmente nos maiores grãos. Devido à fragilidade deste material já envelhecido e formado por grumos em alguns pontos, esta quebra torna a mistura mais fina e alteraria a curva de compactação original.

A influência da temperatura também é outro mecanismo que pode afetar diretamente o desempenho das misturas. Pela utilização de um material envolto ao ligante asfáltico, o calor pode ter impacto direto no momento da compactação do material, uma vez que em temperaturas elevadas o poder cimentício do ligante asfáltico pode ser reestabelecido, mesmo que em baixo potencial. Dessa forma, seria ainda mais imprevisível analisar a quebra, ou não, do material fresado na compactação.

4.2 Compactação

Neste item são apresentados os resultados de estabilização mecânica do material fresado e também das misturas estabilizadas granulometricamente. Portanto, duas curvas de compactação foram obtidas para cada material fresado, uma do material fresado (estabilização mecânica) e outra da mistura. No caso onde se tem estabilização química com adição de cimento (Etapas 3 e 3.1) foram utilizados parâmetros de compactação da curva 70/30 de cada material estabilizado granulometricamente. As tabelas 24 e 25 apresentam os resultados do ensaio de compactação do material fresado e da mistura 70/30, da BR-290.

Tabela 24 – BR-290 - Resultados do ensaio de compactação do fresado

| Ponto | Umidade (%) | Massa específica aparente seca (g/cm ³) |
|-------|-------------|---|
| 1 | 3,03 | 1,938 |
| 2 | 5,31 | 1,963 |
| 3 | 6,37 | 2,018 |
| 4 | 9,16 | 1,992 |
| 5 | 10,04 | 1,972 |

Tabela 25 – BR-290 - Resultados do ensaio de compactação da mistura 70/30

| Ponto | Umidade (%) | Massa específica aparente seca (g/cm³) |
|--------------|--------------------|--|
| 1 | 3,31 | 2,007 |
| 2 | 5,37 | 2,024 |
| 3 | 7,15 | 2,076 |
| 4 | 8,67 | 2,088 |
| 5 | 13,82 | 1,985 |

As tabelas 26 e 27 apresentam os resultados do ensaio de compactação do material fresado e da mistura 70/30, respectivamente, da ERS-509. A figura 60 apresenta as curvas de compactação obtidas das estabilizações de cada material.

Tabela 26 – ERS-509 - Resultados do ensaio de compactação do fresado

| Ponto | Umidade (%) | Massa específica aparente seca (g/cm³) |
|--------------|--------------------|--|
| 1 | 3,94 | 1,791 |
| 2 | 5,63 | 1,792 |
| 3 | 7,73 | 1,814 |
| 4 | 9,7 | 1,826 |
| 5 | 9,79 | 1,792 |

Tabela 27 – ERS-509 - Resultados do ensaio de compactação da mistura 70/30

| Ponto | Umidade (%) | Massa específica aparente seca (g/cm³) |
|--------------|--------------------|--|
| 1 | 6,96 | 1,893 |
| 2 | 8,16 | 1,937 |
| 3 | 8,99 | 1,962 |
| 4 | 9,36 | 1,959 |
| 5 | 9,52 | 1,950 |

A partir da curva de compactação foi possível determinar os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, apresentados na tabela 28.

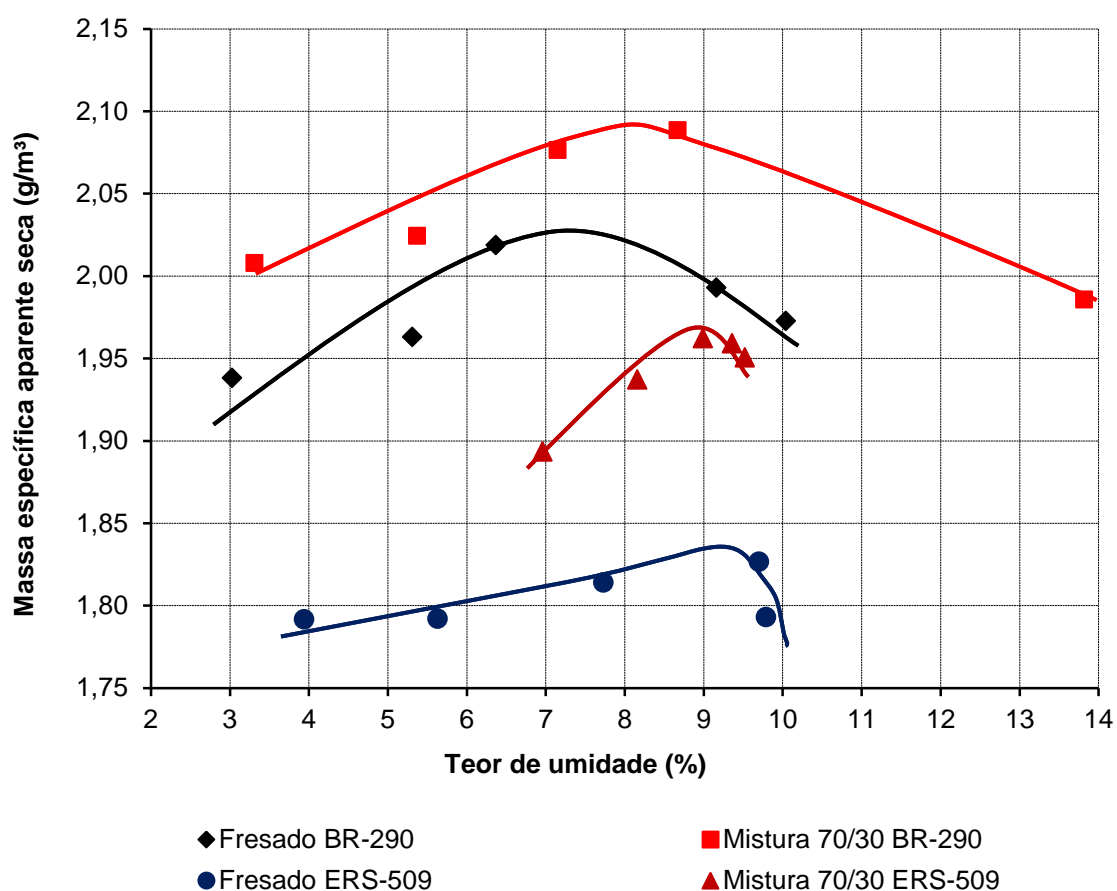


Figura 60 – Curvas de compactação Proctor

Tabela 28 – Resultados do ensaio de compactação

| Mistura | Umidade ótima (%) | Massa específica aparente seca máxima (g/cm^3) |
|-----------------------|-------------------|---|
| Fresado BR-290 | 7,20 | 2,023 |
| Mistura 70/30 BR-290 | 8,20 | 2,092 |
| Fresado ERS-509 | 9,20 | 1,827 |
| Mistura 70/30 ERS-509 | 8,80 | 1,963 |

A análise dos resultados das curvas e dos parâmetros de compactação dos materiais em estudo permite afirmar que a adição do material virgem preenche os vazios do fresado, o que é demonstrado pelo aumento do valor de $\gamma_{dm\acute{a}x}$. Sendo este extremamente benéfico, uma vez que materiais com menores índices de vazios

tendem a ter uma maior resistência ao cisalhamento e uma menor rigidez, tornando interessante na aplicação em camadas de pavimentos.

A comparação dos valores encontrados para o fresado com dados da literatura indica pequena variação nos valores, no caso do $\gamma_{dm\acute{a}x}$ do fresado da BR-290, $2,023 \text{ g/cm}^3$ se aproxima de $2,1 \text{ g/cm}^3$ encontrado por Silva (2012). Já o material fresado da rodovia ERS-509, $\gamma_{dm\acute{a}x} = 1,827 \text{ g/cm}^3$ se equipara com $1,798 \text{ g/cm}^3$ do trabalho de Pinto, Cervo e Pereira (2012). Tais variações são bastante comuns, visto se tratarem de materiais de fontes distintas, e também pelo fato do fresado estar envolto pelo ligante asfáltico, sendo este um material hidrofóbico que dificulta o contato da água com os grãos.

Silva (2012) ao estabilizar o material fresado com pó de pedra, nas mesmas proporções de 70% de fresado e 30% material virgem, encontrou $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com variações em dois picos na curva de compactação. O primeiro pico com h_{ot} de 3,5% e $\gamma_{dm\acute{a}x}$ aproximadamente de $2,175 \text{ g/cm}^3$, já no segundo pico h_{ot} de 7,1% e $\gamma_{dm\acute{a}x}$ aproximadamente de $2,25 \text{ g/cm}^3$. Os valores encontrados pro Silva mostram que pode haver indefinições de curvas em um mesmo material, mas resultados estes que não fogem dos valores encontrados nesta pesquisa.

4.3 Índice de Suporte Califórnia – ISC

Os resultados dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia são apresentados na tabela 29.

Tabela 29 – Resultados do ensaio de ISC

| | Material | Expansão | ISC (%) |
|---------|---------------|----------|---------|
| BR-290 | Fresado | 0 | 56 |
| | Mistura 70/30 | 0 | 95 |
| ERS-509 | Fresado | 0 | 21 |
| | Mistura 70/30 | 0 | 68 |

Estes valores são típicos de solos grossos, pedregulhosos, do grupo G do Sistema Unificado de Classificação de Solos ou ainda dos grupos A1 e A2 da classificação do TRB (Transportation Research Board) (DNER, 1996). Materiais com ISC nesta ordem de grandeza são tipicamente utilizados como sub-base, onde a exigência vigente é que o ISC seja maior que 20% e expansão inferior a 1%, valores estes encontrados em todas as amostras ensaiadas.

Pinto, Cervo e Pereira (2012) encontraram o valor de 38% para o material fresado, Silva (2012) obteve 30%, ambos utilizando a energia modificada. Para o fresado oriundo da BR-290 determinou-se o ISC de 56%, e para material fresado da ERS-509 21%.

Silva (2012) encontrou ISC de 45% para mistura estabilizada, abaixo dos valores encontrados nas misturas com materiais da BR-290 (95%) e RS-509 (68%). Os resultados mostram a eficiência da técnica, abrindo inúmeras possibilidades de utilização como camada de pavimento. Conforme preconizado pelo método de projetos do DNER de 1981, para utilização como base granular de pavimentos o valor de ISC deve ser maior que 80% e expansão menor que 0,5%. Para o caso de rodovias com tráfego menor que 10^6 repetições do eixo padrão, para o período de projeto considerado, há a possibilidade de utilizar materiais com ISC maior ou igual a 60%.

A análise dos resultados é sempre realizada a partir do material tradicional, neste caso a BGS – Brita graduada simples. Ao reproduzirmos este material com a mistura contendo material fresado, algumas peculiaridades podem ser discutidas. Assim como foi tratado no ensaio de compactação (item 4.2), a temperatura pode influenciar diretamente no desempenho das misturas, sendo possível também questionar o potencial de cicatrização da mistura. Na compactação das amostras, esse processo de cicatrização pode ser estabelecido devido às propriedades do ligante asfáltico presente no material fresado. A partir disso, tem-se que o material fresado tende a ganhar rigidez com o tempo quando puro, o que pode não ocorrer quando estabilizado com outros materiais. Nessa premissa, a utilização do pó de pedra, por exemplo, pode vir a anular essa cicatrização do material fresado, podendo inibir o aumento da rigidez em idades avançadas. Portanto, é neste momento em que é aplicada a estabilização química com o cimento Portland, apresentada a seguir.

4.4 Estabilização química com cimento Portland

A estabilização química foi realizada pela moldagem de corpos de prova para ensaio de RCS, com 2, 3, 4, 5 e 6% de cimento Portland CP IV-32, em cura úmida por 7 e 28 dias. A aplicação do cimento se deu por substituição da massa seca do material, a tabela 30 traz os valores de RCS obtidos, assim como a figura 61 apresenta uma plotagem dos resultados.

Tabela 30 – Resultados de RCS para estabilização química

| Mistura | Dias de cura | Teor de cimento (%) | RCS Médio (MPa) | Taxa crescimento (%) |
|---------|--------------|---------------------|-----------------|----------------------|
| BR-290 | 7 | 2 | 0,38 | - |
| | | 3 | 0,61 | - |
| | | 4 | 1,09 | - |
| | | 5 | 1,83 | - |
| | 28 | 2 | 0,40 | 6,7% |
| | | 3 | 0,94 | 54,6% |
| | | 4 | 1,38 | 26,9% |
| | | 5 | 2,07 | 13,3% |
| ERS-509 | 7 | 3 | 0,75 | - |
| | | 4 | 0,93 | - |
| | | 5 | 1,16 | - |
| | | 6 | 1,87 | - |
| | 28 | 3 | 1,11 | 48,7% |
| | | 4 | 1,53 | 64,1% |
| | | 5 | 2,13 | 83,5% |
| | | 6 | 2,27 | 21,3% |

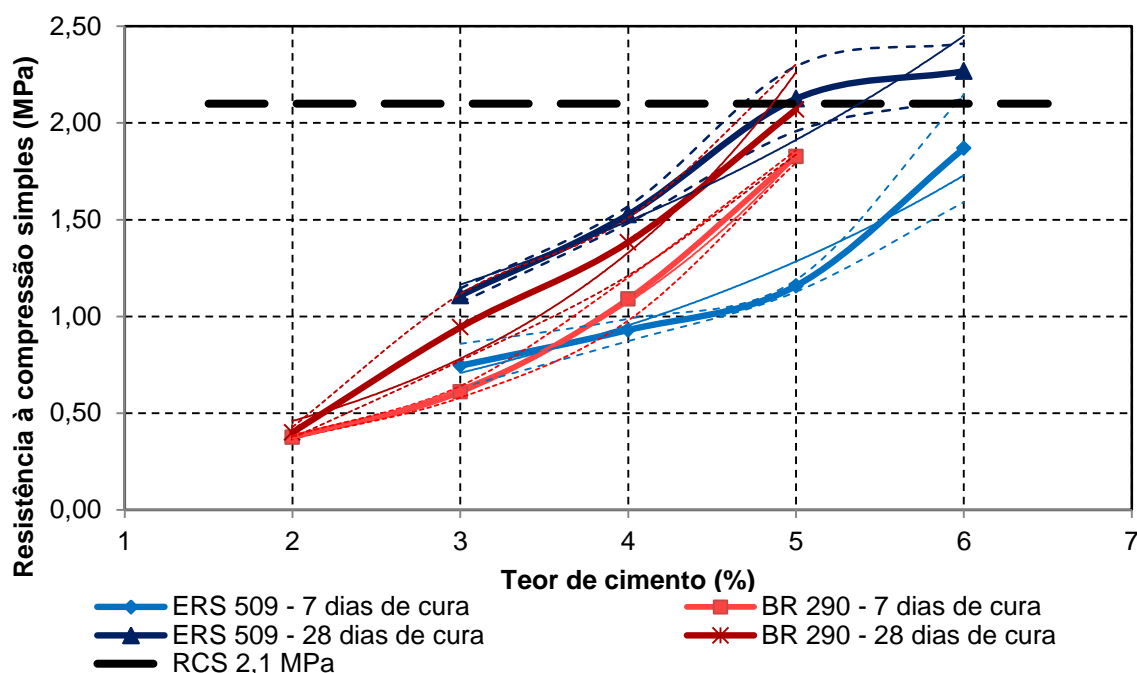


Figura 61 – Teor de cimento x RCS (MPa)

A figura 61 mostra os resultados das duas misturas estabilizadas quimicamente, com material fresado da BR-290 e da ERS-509, ambas para 7 e 28 dias de cura. As linhas tracejadas apresentam os valores acrescidos e subtraídos do desvio padrão e as linhas sólidas representam o ajuste matemático que descreve a tendência dos dados de cada curva. Ao fazer essa apresentação, é possível perceber a importância do tempo de cura no ganho de resistência. A tabela 30 traz as taxas de crescimento de 7 para 28 dias, com aumento de até 83% e 54% na resistência, para misturas da ERS-509 e BR-290 respectivamente.

Segundo as normas brasileiras sobre solo-cimento, o teor de cimento adotado deve ser aquele cuja resistência média à compressão simples seja igual ou superior a 2,1 MPa aos sete dias. Segundo tal prescrição o teor de cimento que deveria ser empregado, sem margem operacional, seria de 6,65% (ERS-509) e 5,26% (BR-290). No caso de implantação de uma rodovia e dependendo das condições, é aceitável que ao invés de 7 dias de cura seja considerado 28 dias, quando as reações de cimentação estariam chegando a um patamar de estabilização e, neste caso, de acordo com as curvas de tendência dos resultados de RCS, o teor de cimento

encontrado foi de 5,37% para a mistura com fresado da ERS-509 e 4,86% com fresado da BR-290, valores estes utilizados no decorrer da pesquisa.

O teor de cimento pode ser considerado elevado e lembrando que está sendo trabalhado com 30% de material virgem proveniente de britagem, o aspecto econômico deve ser avaliado cuidadosamente. Vale lembrar que o cimento utilizado foi o CP IV-32, cuja cura é lenta e benéfica no caso de grandes volumes de material, evitando ou minimizando a retração térmica e conseqüentemente, o trincamento advindo deste processo.

Alguns trabalhos encontrados na literatura nacional apresentam valores abaixo destes encontrados, com algumas ressalvas. Trichês e Santos (2013) encontraram o valor de 3,0% ao estabilizar mistura com 30% de material fresado e 70% de agregado virgem, valores inversos ao desta pesquisa, justificando o baixo teor de cimento. Silva e Miranda Júnior (2000) obtiveram o teor de 3,0% para resistências superiores, os autores moldaram corpos de prova de camada de pavimento reciclado, sem definição do teor de material fresado e outros materiais da mistura.

4.5 Estabilização química com CCA

Com os resultados obtidos de estabilização química, foi fixado o teor de cimento de 5,37% para substituição deste pela CCA conforme metodologia proposta. A estabilização química com a substituição do cimento Portland por CCA moída foi realizada apenas para a mistura estabilizada com material fresado oriundo da ERS-509. Para tanto, nesta estabilização, uma gama maior de ensaios foi realizada, a fim de encontrar alternativas ao uso do cimento na pavimentação, sem perda de eficiência técnica.

A determinação dos teores utilizados para substituir o cimento pela CCA foi baseada na literatura nacional sobre concreto de cimento Portland (DUART, 2008; ISAIA *et al*, 2010; SOKOLOVICZ, 2013). Os avanços desta área da construção civil na utilização da CCA estão à frente no que diz respeito à aplicação em pavimentos. Como apresentado anteriormente, as percentagens utilizadas de CCA (15, 30 e

50%) foram aplicadas nas misturas fazendo a substituição em massa do cimento Portland pela cinza de casca de arroz, conforme dados da tabela 31.

Tabela 31 – Teores de cimento Portland e CCA nas misturas

| Cimento Portland (%) | CCA (%) | Teor Cimento Portland na mistura (%) | Teor CCA na mistura (%) |
|----------------------|---------|--------------------------------------|-------------------------|
| 100 | - | 5,37 | - |
| 85 | 15 | 4,56 | 0,81 |
| 70 | 30 | 3,76 | 1,61 |
| 50 | 50 | 2,685 | 2,685 |

Ao analisar os resultados da massa específica da CCA (Tabela 19), aproximadamente $2,08 \text{ g/cm}^3$, com o resultado de $2,74 \text{ g/cm}^3$ do CP IV-32 (Tabela 16), fica evidente que ao fazer substituição em massa destes materiais nas misturas, os volumes são alterados. Reiterando também que os parâmetros de compactação dos corpos de prova com estabilizantes químicos partem dos resultados das misturas estabilizadas granulometricamente, onde não fora adicionado algum estabilizante químico para determinação dos teores de umidade ótima e densidade aparente seca máxima.

A seguir são apresentados todos os resultados dos ensaios realizados com amostras da mistura estabilizada com CCA. Para todos os ensaios as amostras foram retiradas da câmara úmida para realização imediata dos respectivos testes.

4.5.1 Resistência à compressão simples

As figuras 62 e 63 apresentam os resultados de RCS para as misturas estabilizadas com CCA #325 e #500, respectivamente. Também são apresentadas linhas de referência que representam as resistências obtidas nas amostras sem utilização da CCA, apenas com cimento Portland.

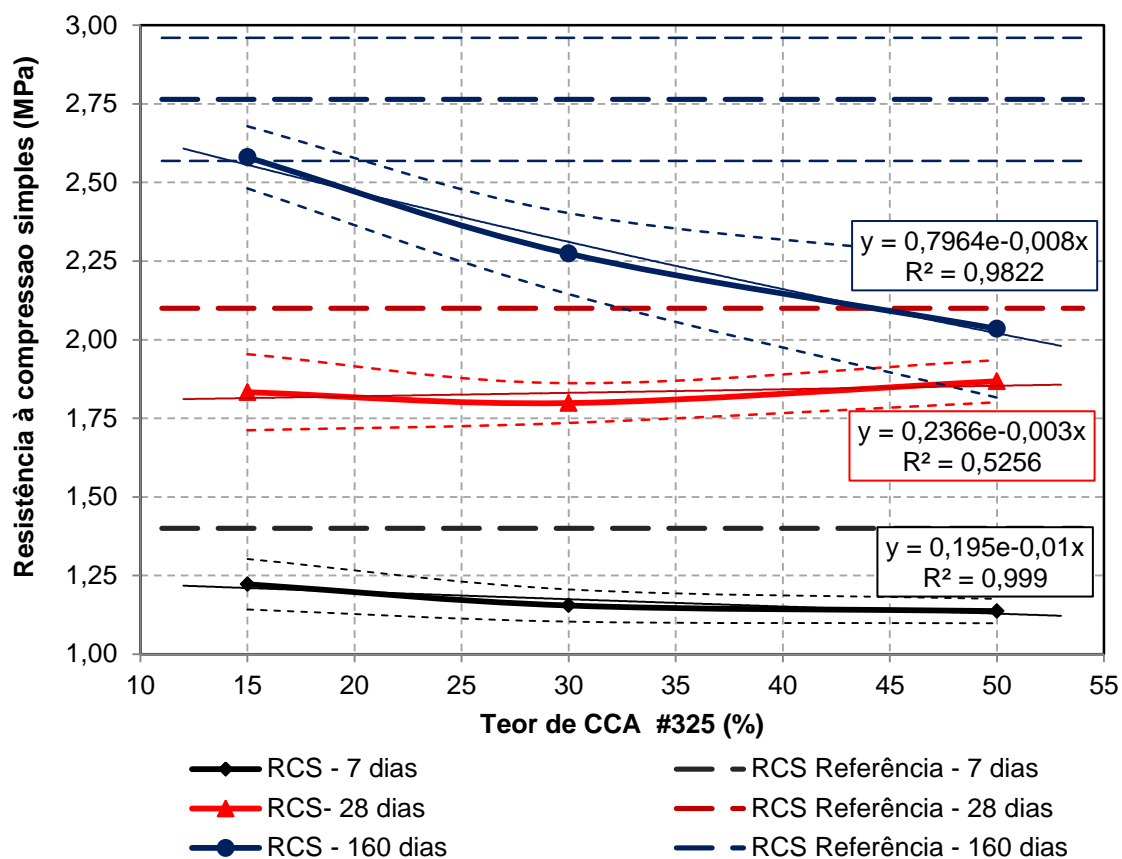


Figura 62 – Teor CCA #325 x RCS (MPa)

Para 7 e 28 dias, as linhas de referência não apresentam linhas tracejadas de desvio padrão. Isso ocorre, pois as resistências de referência para estas idades foram determinadas a partir da estabilização química apresentada no item 4.4, por meio de cálculos matemáticos das linhas de tendência.

Os resultados demonstram que a substituição do cimento Portland pozolânico por CCA faz com que a sua resistência à compressão diminua com o aumento do teor adotado:

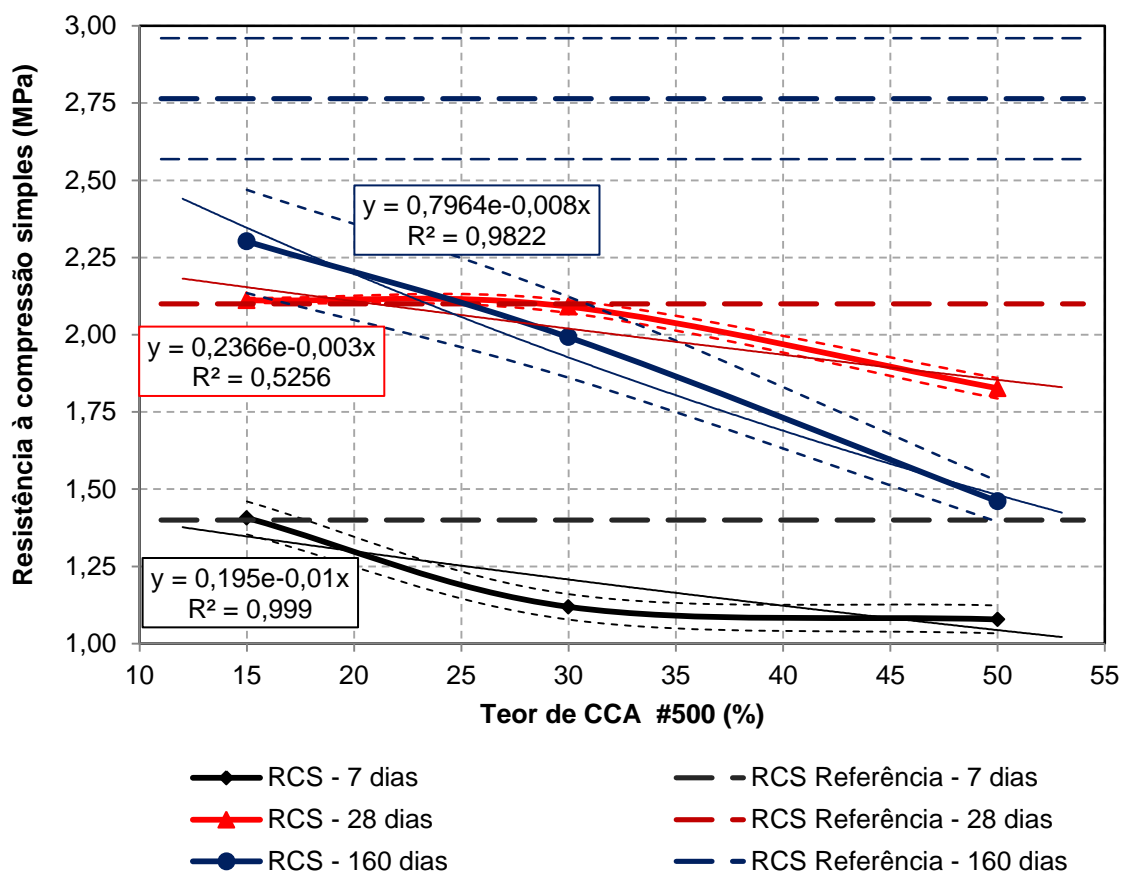


Figura 63 – Teor CCA #500 x RCS (MPa)

- As amostras com substituição em 15% de CCA apresentaram os resultados mais próximos das linhas de referência. A CCA #500 apresentou resultados iguais das amostras de referência para 7 (1,4 MPa) e 28 (2,1 MPa) dias de cura, e cerca de 16% menos resistência aos 160 dias (2,76 MPa). Os resultados para CCA #325 foram satisfatórios, com quedas que variaram de 6 a aproximadamente 13% da referência para cada idade, como mostra a tabela 32.

- Ao analisar as amostras com 15% de CCA em relação aos 7 dias de idade, o aumento foi de 50% na resistência aos 28 dias para ambas as finuras de CCA, crescimento de 111% para CCA #325 e 63% para #500. Vale salientar que todas amostras foram curadas de igual maneira, mas ficou evidente a diferença na umidade das amostras com 160 dias de cura em relação as demais no momento em que foram rompidas, apresentando aspecto de baixa umidade para os corpos de prova neste ensaio.

- Ao substituir o cimento por 30% de CCA, houve perda de até 20% aos 7 dias para ambas finuras de CCA. Já para 28 dias a CCA #325 apresentou perda de 14% e a CCA #500 ficou similar a referência. Aos 160 de cura a resistência caiu entre 17 de 28%.

- As resistências aos 28 dias em relação aos 7, para 30% de CCA, cresceu em 56% (#325) e 86% (#500). Os resultados aos 160 dias começam a ficar mais evidentes com o aumento no teor de CCA, devido a elevada queda das curvas. Em comparação de 7 para 160 dias, houve crescimento de 97% e 77%, para #325 e #500, respectivamente. O crescimento da resistência aos 160 dias foi menor ao comparar com 28 dias, que foi de 86% para CCA #500, mais um fato que pode ser explicado pelo aspecto de baixa umidade que as amostras apresentaram.

- As amostras moldadas com 50% de CCA tiveram perda de aproximadamente 18% (#325) e 23% (#500) em relação a referência aos 7 dias. Para 28 dias as perdas ficaram próximas de 12% para as duas cinzas. Aos 160 dias os piores resultados, com diferenças de 26% (#325) e 47% (#500).

- O ganho de resistência em relação aos 7 dias ficou próximo de 64% e 69% para 28 dias, quando adotado 50% de CCA. E assim como na estabilização com 30% de CCA, aos 160 dias o ganho de resistência ficou abaixo das amostras com 28 dias de cura para #500, 35%. Para #325 o crescimento foi de 78%.

Em uma análise geral, os melhores desempenhos são observados com baixo teor de CCA (15%) e em sua malha mais fina, a CCA #500, onde com 7 e 28 dias de cura os resultados encontrados foram ligeiramente superiores as amostras de referência. Para todas as amostras com 28 dias de cura foi obtido ganho de no mínimo 50% de resistência em relação aos 7 dias, chegando a até aproximadamente 86% em determinadas dosagens. As amostras ensaiadas aos 160 dias apresentaram o menor desempenho, com resultados inferiores aos de 28 dias em alguns casos.

Tabela 32 – Taxas de variação nos ensaios de RCS

| CCA | % | Dias de Cura | RCS (MPa) | Variação da resistência em relação a Ref. (%) | Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%) |
|------|----|--------------|-----------|---|---|
| Ref. | - | 7 | 1,40 | - | - |
| #325 | 15 | 7 | 1,22 | -12,86% | |
| #325 | 30 | 7 | 1,15 | -17,86% | |
| #325 | 50 | 7 | 1,14 | -18,57% | |
| #500 | 15 | 7 | 1,41 | +0,71% | |
| #500 | 30 | 7 | 1,12 | -20,00% | |
| #500 | 50 | 7 | 1,08 | -22,86% | |
| Ref. | - | 28 | 2,10 | - | +50,00% |
| #325 | 15 | 28 | 1,83 | -12,86% | +50,00% |
| #325 | 30 | 28 | 1,80 | -14,29% | +56,52% |
| #325 | 50 | 28 | 1,87 | -10,95% | +64,04% |
| #500 | 15 | 28 | 2,11 | +0,48% | +49,65% |
| #500 | 30 | 28 | 2,09 | -0,48% | +86,61% |
| #500 | 50 | 28 | 1,83 | -12,86% | +69,44% |
| Ref. | - | 160 | 2,76 | - | +97,14% |
| #325 | 15 | 160 | 2,58 | -6,52% | +111,48% |
| #325 | 30 | 160 | 2,27 | -17,75% | +97,39% |
| #325 | 50 | 160 | 2,03 | -26,45% | +78,07% |
| #500 | 15 | 160 | 2,30 | -16,67% | +63,12% |
| #500 | 30 | 160 | 1,99 | -27,90% | +77,68% |
| #500 | 50 | 160 | 1,46 | -47,10% | +35,19% |

Com o intuito de conhecer a real efetividade da CCA nas misturas, foram analisadas as resistências dos corpos de prova com CCA juntamente àqueles utilizados na estabilização química com cimento Portland (Item 4.4). A determinação do teor de cimento utilizado na pesquisa, fora definido através da curva de tendência das resistências obtidas para 7 e 28 dias de cura úmida, em corpos de prova com 3, 4, 5, e 6% de cimento Portland. Estes resultados foram utilizados para analisar a efetividade da CCA, conforme mostram as figuras 64 e 65.

Os resultados obtidos mostram que em todas as dosagens ocorre ganho de resistência quando utilizada a CCA como estabilizante químico junto ao cimento Portland. A tabela 33 apresenta as resistências em MPa de cada mistura utilizada com CCA e sua variação de acordo com a respectiva referência.

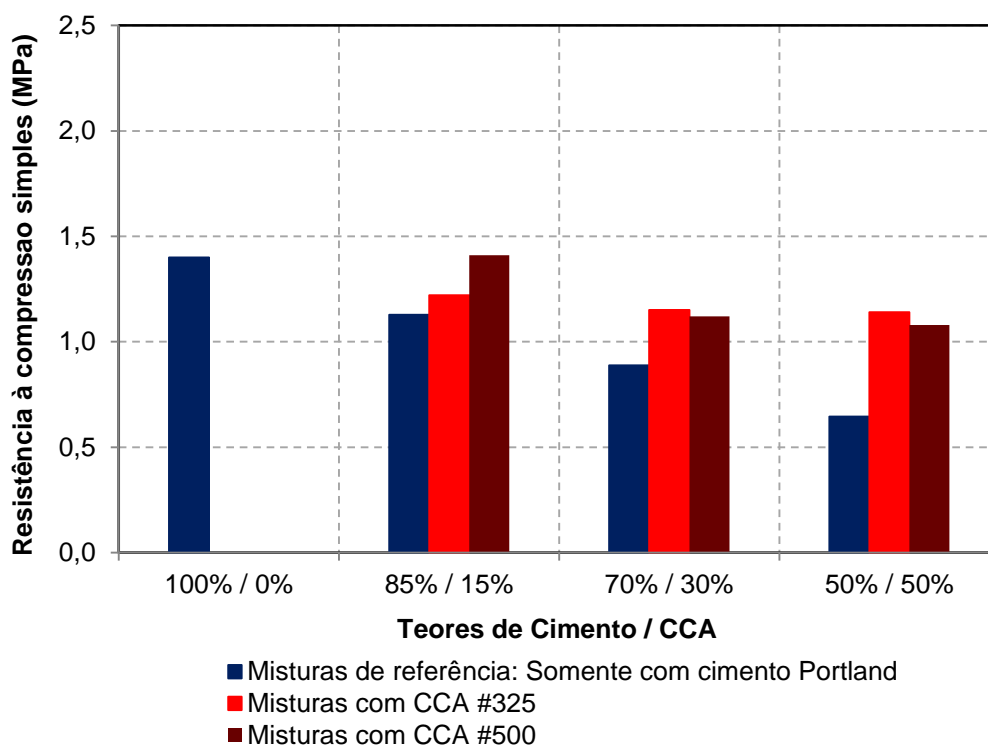


Figura 64 – RCS: Efetividade da CCA aos 7 dias

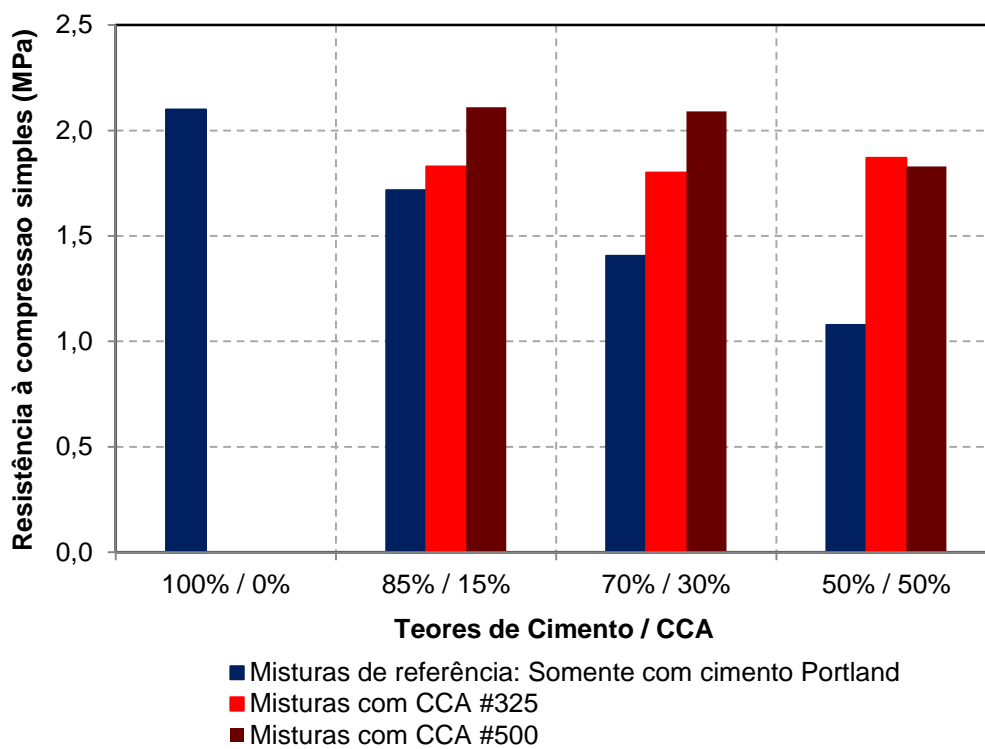


Figura 65 – RCS: Efetividade da CCA aos 28 dias

Estas variações, sempre positivas, aumentando a resistência entre aproximadamente 8% e 76% nas amostras ensaiadas aos 7 dias, e de 6% a 73% quando ensaiadas aos 28 dias. Nesta análise, os ganhos significativos ficam por conta das misturas com 50% de CCA em ambas as idades e finuras de CCA.

Tabela 33 – RCS: Efetividade da CCA

| CCA | Teor cimento | Teor de CCA | Dias de Cura | RCS (MPa) | Varição da resistência em relação a Ref. (%) |
|------|--------------|-------------|--------------|-----------|--|
| Ref. | 85% | - | 7 | 1,13 | - |
| #325 | 85% | 15% | 7 | 1,22 | 8,12% |
| #500 | 85% | 15% | 7 | 1,41 | 24,96% |
| Ref. | 70% | - | 7 | 0,89 | - |
| #325 | 70% | 30% | 7 | 1,15 | 29,55% |
| #500 | 70% | 30% | 7 | 1,12 | 26,17% |
| Ref. | 50% | - | 7 | 0,64 | - |
| #325 | 50% | 50% | 7 | 1,14 | 76,83% |
| #500 | 50% | 50% | 7 | 1,08 | 67,52% |
| Ref. | 85% | - | 28 | 1,72 | - |
| #325 | 85% | 15% | 28 | 1,83 | 6,59% |
| #500 | 85% | 15% | 28 | 2,11 | 22,90% |
| Ref. | 70% | - | 28 | 1,41 | - |
| #325 | 70% | 30% | 28 | 1,80 | 28,02% |
| #500 | 70% | 30% | 28 | 2,09 | 48,65% |
| Ref. | 50% | - | 28 | 1,08 | - |
| #325 | 50% | 50% | 28 | 1,87 | 73,59% |
| #500 | 50% | 50% | 28 | 1,83 | 69,88% |

4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

As figuras 66 e 67, a seguir, apresentam os resultados de RTCD para as misturas estabilizadas com CCA #325 e #500, respectivamente. Os resultados obtidos para RTCD foram positivos, houve baixa perda de resistência em comparação às amostras de referência, e um ganho significativo em idades avançadas.

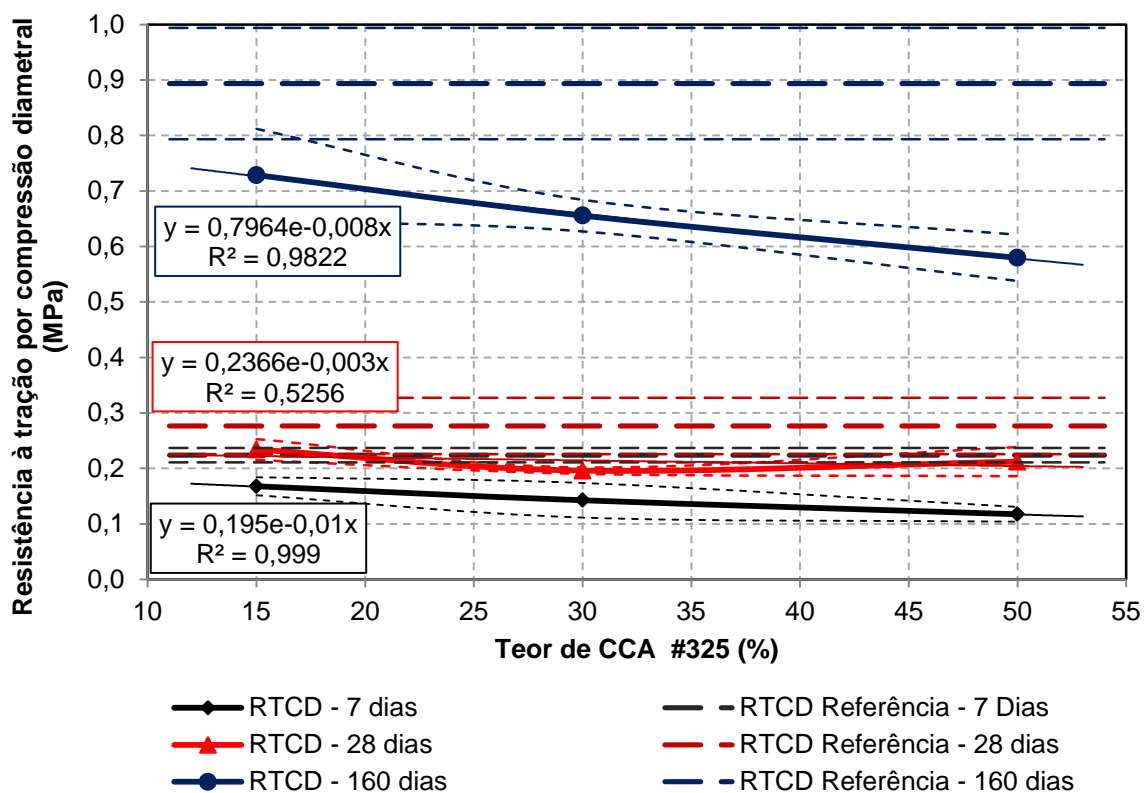


Figura 666 – Teor CCA #325 x RTCD (MPa)

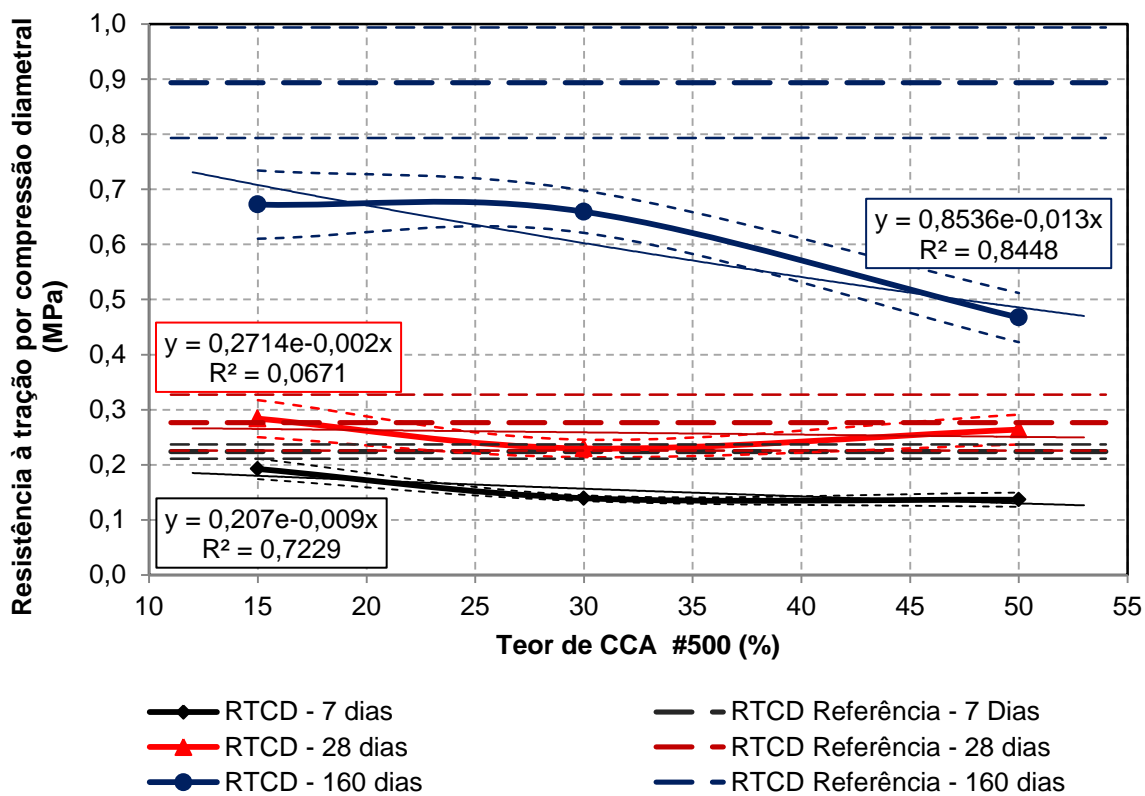


Figura 67 – Teor CCA #500 x RTCD (MPa)

Para apresentar os resultados, estes foram tabelados para então analisar suas taxas de variação (Tabela 34):

- Os valores de referência ficaram em 0,224 MPa aos 7 dias; 0,277 MPa aos 28 dias, crescimento de 23%; e 0,894 MPa aos 160 dias de cura, 4 vezes a resistência de 7 dias, ganho de 300%.
- Ao adicionar 15% de CCA, análise a partir da referência, para 7 dias, quedas de 25% (#325) e 14% (#500). Os resultados aos 28 dias tiveram melhor desempenho, com perda de 15% para #325 e ganho de 2,5% com CCA #500. Ao ensaiar com 160 dias de cura, a resistência voltou a cair, -18% e -24%.
- O aumento da resistência, em relação aos 7 dias, foi positivo em todas amostras com 15% de CCA. Com 28 dias de cura, os ganhos foram de no mínimo 39%. Já aos 160 dias os resultados mais expressivos, ganho de 333% para #325 e 250% para #500. Lembrando que estas análises são comparadas as amostras de mesma dosagem.
- Ao substituir o cimento por 30% de CCA, houve perda de aproximadamente 36% aos 7 dias para ambas cinzas. Os ensaios com 28 dias apresentaram diferença de -29% e -17%, para #325 e #500 respectivamente. Aos 160 de cura a resistência ficou cerca de 26% menor os resultados de referência.
- As resistências aos 28 dias em relação aos 7, para 30% de CCA, cresceu em 37% (#325) e 65% (#500). Para 160 dias de cura, os resultados foram expressivos novamente, crescimentos de aproximadamente 360% com os dois materiais utilizados.
- As amostras moldadas com 50% de CCA tiveram perda de aproximadamente 47% (#325) e 38% (#500) em relação a referência aos 7 dias. Para 28 dias as resistências caíram 23% e 4,6%, #325 e #500 respectivamente. Aos 160 dias foram obtidas diferenças de -35% (#325) e -47% (#500).
- O ganho de resistência em relação aos 7 dias ficou próximo de 81% e 92% para 28 dias, quando adotado 50% de CCA. Com rompimento das amostras aos 160 dias, crescimento de 395% para #325 e 240% para #500.

Dalla Rosa, Jorge e Muller (2013) moldaram corpos de prova para ensaios de RTCD com material oriundo da reciclagem da rodovia BR-116, no estado do Rio Grande do Sul. A reciclagem contemplou 5 cm de revestimento asfáltico (CBUQ) e 10 cm de base de BGS, e então adicionados 3% de cimento Portland CP IV-32 para

estabilização química. Os resultados obtidos com 28 dias de idade foram de aproximadamente 0,21 MPa, pouco inferiores ao encontrado nesta pesquisa. É importante salientar que o teor de cimento adotado pelos autores foi menor e utilizado somente materiais reciclados do pavimento, por outro lado, a dosagem da mistura ficou com teor menor de fresado.

Tabela 34 – Taxas de variação nos ensaios de RTCD

| CCA | % | Dias de Cura | RTCD (MPa) | Variação da resistência em relação a Ref. (%) | Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%) |
|------|----|--------------|------------|---|---|
| Ref. | - | 7 | 0,224 | - | - |
| #325 | 15 | 7 | 0,168 | -25,00% | |
| #325 | 30 | 7 | 0,143 | -36,16% | |
| #325 | 50 | 7 | 0,117 | -47,77% | |
| #500 | 15 | 7 | 0,192 | -14,29% | |
| #500 | 30 | 7 | 0,139 | -37,95% | |
| #500 | 50 | 7 | 0,137 | -38,84% | |
| Ref. | - | 28 | 0,277 | - | +23,66% |
| #325 | 15 | 28 | 0,234 | -15,52% | +39,29% |
| #325 | 30 | 28 | 0,196 | -29,24% | +37,06% |
| #325 | 50 | 28 | 0,212 | -23,47% | +81,20% |
| #500 | 15 | 28 | 0,284 | +2,53% | +47,92% |
| #500 | 30 | 28 | 0,230 | -16,97% | +65,47% |
| #500 | 50 | 28 | 0,264 | -4,69% | +92,70% |
| Ref. | - | 160 | 0,894 | - | +299,11% |
| #325 | 15 | 160 | 0,729 | -18,46% | +333,93% |
| #325 | 30 | 160 | 0,656 | -26,62% | +358,74% |
| #325 | 50 | 160 | 0,580 | -35,12% | +395,73% |
| #500 | 15 | 160 | 0,672 | -24,83% | +250,00% |
| #500 | 30 | 160 | 0,659 | -26,29% | +374,10% |
| #500 | 50 | 160 | 0,467 | -47,76% | +240,88% |

As figuras 68 e 69 mostram um corpo de prova rompido por compressão diametral, este que foi seco à temperatura ambiente para que pudesse ser analisado onde houve o rompimento. Puderam ser constatados alguns pontos de quebra do material fresado, já que o visual é facilitado pelo contraste das cores escuras do fresado com a cor clara que o cimento apresenta depois de seco.



Figura 68 – Amostra rompida a compressão diametral

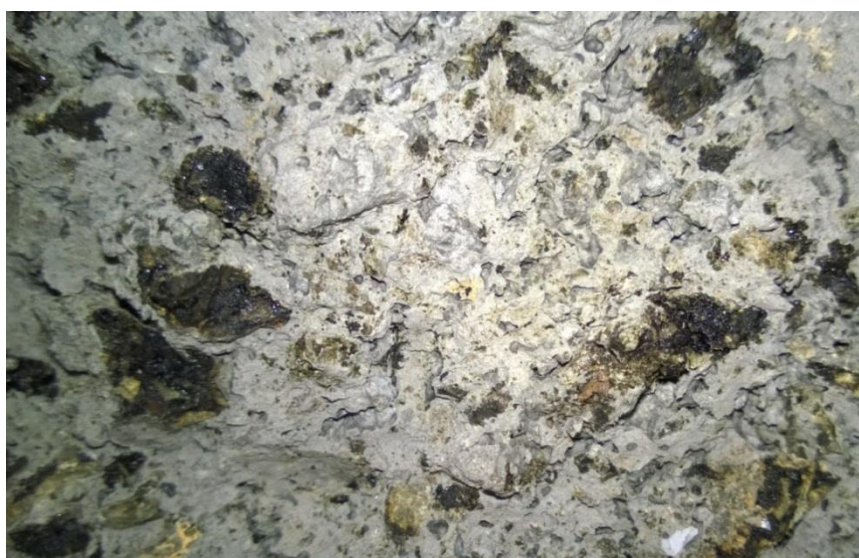


Figura 69 – Imagem aproximada de amostra rompida à compressão diametral

A figura 69 apresenta uma imagem aproximada da amostra rompida. Os pontos escuros maiores representam o material fresado formado por grumos, que na granulometria compõem os agregados graúdos da mistura. Essa visualização colabora com a ideia de baixa resistência do fresado, tornando este um possível ponto fraco da mistura. Aqui mais uma vez poderíamos citar a influência da temperatura, com a possibilidade de maior rigidez desses agregados após a compactação da amostra com o material fresado em maiores temperaturas. Para

tanto, neste caso deveria existir algum ajuste na curva de compactação para o teor de umidade ótimo, uma vez que a água adicionada poderia não ser suficiente para hidratação do cimento Portland.

Para melhor análise dos resultados de RTCD foram calculadas as relações com os resultados de RCS (Tabela 35). Este procedimento é aplicado para que seja determinada a porcentagem que a resistência à compressão representa para a resistência à tração, apenas para método de análise.

Tabela 35 – Relação RCS para RTCD

| Dias de Cura | CCA | % | RCS Final (MPa) | RT Final (MPa) | RCS/RT |
|--------------|-------|------|-----------------|----------------|--------|
| 7 | Ref. | Ref. | 1,400 | 0,224 | 16,00% |
| 7 | # 325 | 15% | 1,222 | 0,168 | 13,74% |
| 7 | # 325 | 30% | 1,154 | 0,143 | 12,36% |
| 7 | # 325 | 50% | 1,137 | 0,117 | 10,33% |
| 7 | # 500 | 15% | 1,407 | 0,192 | 13,68% |
| 7 | # 500 | 30% | 1,119 | 0,139 | 12,45% |
| 7 | # 500 | 50% | 1,078 | 0,137 | 12,67% |
| 28 | Ref. | Ref. | 2,100 | 0,277 | 13,17% |
| 28 | # 325 | 15% | 1,833 | 0,234 | 12,77% |
| 28 | # 325 | 30% | 1,798 | 0,196 | 10,91% |
| 28 | # 325 | 50% | 1,868 | 0,212 | 11,36% |
| 28 | # 500 | 15% | 2,112 | 0,284 | 13,44% |
| 28 | # 500 | 30% | 2,091 | 0,230 | 10,99% |
| 28 | # 500 | 50% | 1,827 | 0,264 | 14,45% |
| 160 | Ref. | Ref. | 2,764 | 0,894 | 32,33% |
| 160 | # 325 | 15% | 2,580 | 0,729 | 28,24% |
| 160 | # 325 | 30% | 2,274 | 0,656 | 28,83% |
| 160 | # 325 | 50% | 2,035 | 0,580 | 28,48% |
| 160 | # 500 | 15% | 2,302 | 0,672 | 29,21% |
| 160 | # 500 | 30% | 1,992 | 0,659 | 33,10% |
| 160 | # 500 | 50% | 1,460 | 0,467 | 32,00% |

Ao encontrar a porcentagem da resistência à tração indireta das amostras, que seria a proporção desta no ensaio de resistência à compressão axial, fica evidente que para 7 e 28 dias de idade, os resultados foram muito próximos das referências que a literatura básica destes ensaios apresenta, a RT sendo 10% da

RCS. Aqui os resultados tiveram variação de 10 a 13% em sua maioria, com exceção das amostras de referência de 7 dias que ficou em 16%. Com o ganho elevado de resistência à tração das amostras com 160 dias, apresentados anteriormente, conjuminados ao baixo desempenho dos corpos de prova ensaiados a compressão axial, esta relação extrapolou os limites até então pré-julgados. A resistência à tração, aos 160 dias, apresentou a proporção de no mínimo 28% da resistência à compressão, chegando a até 33% em algumas dosagens. Ficam então mais dados para futuras referências ao mostrar que as relações entre as resistências podem variar conforme o tipo de material ou então por idades avançadas.

A partir da relação apresentada na tabela 35, foram estimados os valores de resistência à compressão diametral das misturas com apenas cimento Portland como estabilizante químico. Essa análise fora realizada para determinar a efetividade da CCA neste ensaio, assim como apresentado anteriormente nos resultados de RCS. Com isso é apresentada a tabela 36, que apresenta os teores de cimento Portland nas misturas, e as respectivas resistências à compressão simples e à tração na compressão diametral. Os valores de RTCD de misturas com cimento Portland em teores abaixo de 5,37% foram determinados a partir da relação RCS / RTCD e são apresentados nas figuras 70 e 71.

Tabela 36 – Valores de RTCD a partir da relação RCS / RT

| Dias de cura | Cimento Portland (%) | Teor cimento Portland na mistura (%) | RCS (MPa) | Relação RCS / RT | RTCD (MPa) |
|--------------|----------------------|--------------------------------------|-----------|------------------|------------|
| 7 | 100 | 5,37 | 1,400 | 16,00% | 1,400 |
| 7 | 85 | 4,56 | 1,128 | 16,00% | 1,128 |
| 7 | 70 | 3,76 | 0,888 | 16,00% | 0,888 |
| 7 | 50 | 2,685 | 0,645 | 16,00% | 0,645 |
| 28 | 100 | 5,37 | 2,100 | 13,17% | 2,100 |
| 28 | 85 | 4,56 | 1,717 | 13,17% | 1,717 |
| 28 | 70 | 3,76 | 1,406 | 13,17% | 1,406 |
| 28 | 50 | 2,685 | 1,077 | 13,17% | 1,077 |

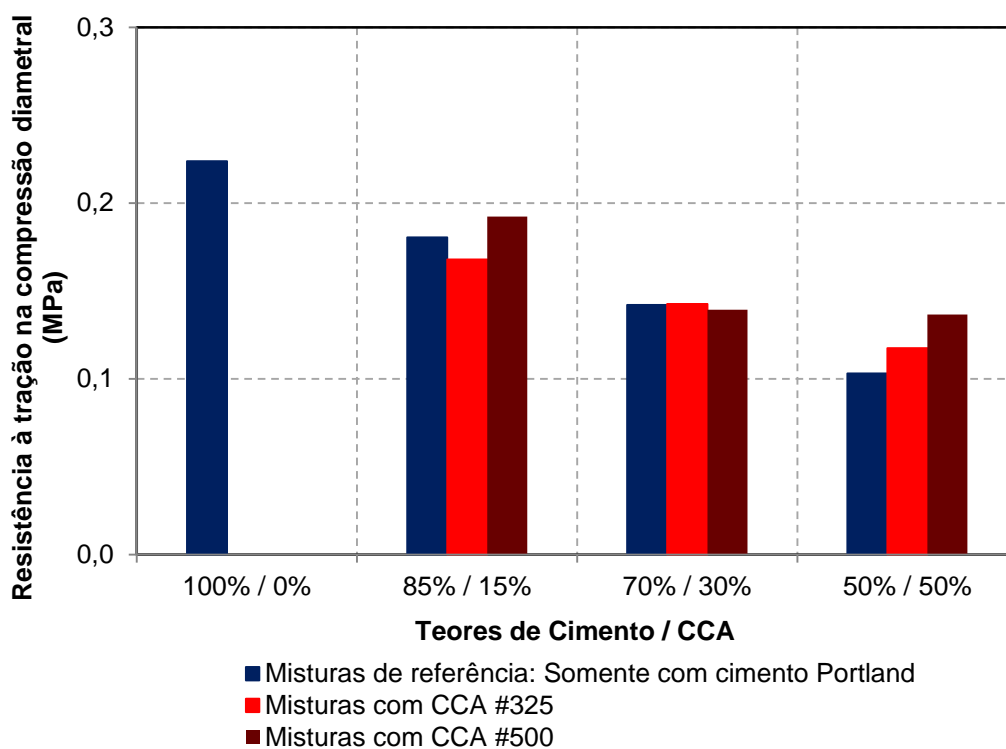


Figura 70 – RTCD: Efetividade da CCA aos 7 dias

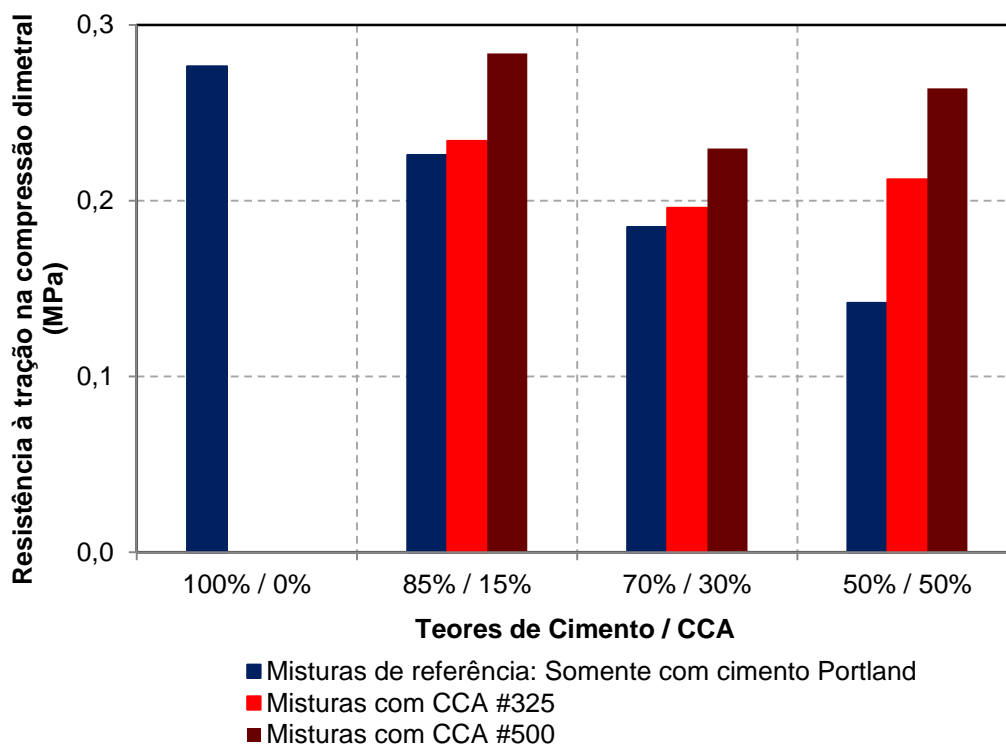


Figura 71 – RTCD: Efetividade da CCA aos 28 dias

Os resultados mostram baixa variação das resistências aos 7 dias de cura, sendo que os melhores desempenhos foram obtidos com a utilização de 50% de CCA, com ganhos de até 32%. Para as amostras com 15% e 30% de CCA, as variações foram baixas, de -7% até 6%. Já os corpos de prova ensaiados aos 28 dias apresentaram melhores desempenhos, onde os ganhos de resistência foram positivos em todas as dosagens com CCA. A tabela 37 apresenta as taxas de variações de resistência, o que mostra a efetividade da CCA, pois todo ganho de resistência se deve pela incorporação da CCA na mistura.

Tabela 37 – RTCD: Efetividade da CCA

| CCA | Teor cimento | Teor de CCA | Dias de Cura | RTCD (MPa) | Varição da resistência em relação a Ref. (%) |
|------|--------------|-------------|--------------|------------|--|
| Ref. | 85% | - | 7 | 0,181 | - |
| #325 | 85% | 15% | 7 | 0,168 | -6,98% |
| #500 | 85% | 15% | 7 | 0,192 | 6,59% |
| Ref. | 70% | - | 7 | 0,142 | - |
| #325 | 70% | 30% | 7 | 0,143 | 0,47% |
| #500 | 70% | 30% | 7 | 0,139 | -1,89% |
| Ref. | 50% | - | 7 | 0,103 | - |
| #325 | 50% | 50% | 7 | 0,117 | 13,85% |
| #500 | 50% | 50% | 7 | 0,137 | 32,44% |
| Ref. | 85% | - | 28 | 0,226 | - |
| #325 | 85% | 15% | 28 | 0,234 | 3,55% |
| #500 | 85% | 15% | 28 | 0,284 | 25,52% |
| Ref. | 70% | - | 28 | 0,185 | - |
| #325 | 70% | 30% | 28 | 0,196 | 5,91% |
| #500 | 70% | 30% | 28 | 0,230 | 24,07% |
| Ref. | 50% | - | 28 | 0,142 | - |
| #325 | 50% | 50% | 28 | 0,212 | 49,64% |
| #500 | 50% | 50% | 28 | 0,264 | 86,06% |

4.5.3 Módulo de resiliência

As figuras 72 e 73 apresentam os resultados de MR para as misturas estabilizadas com CCA #325 e #500, respectivamente. Os resultados de MR

apresentaram valores próximos dos citados por Bernucci *et al* (2008) para materiais graduados tratados com cimento, variando de 6.000 a 12.000 MPa. As amostras de referência ficaram em aproximadamente 6.000 MPa para 7 dias, 7.000 MPa aos 28 dias e 14.000 MPa aos 160 dias de cura, o que mostra claramente o aumento da rigidez do material ao longo do tempo. Os corpos de prova moldados com CCA #325 apresentaram aumento do MR com o aumento do teor de CCA aos 7 e 28 dias, e queda de 14.000 MPa (15%) para 11.000 MPa (50%) aos 160 dias.

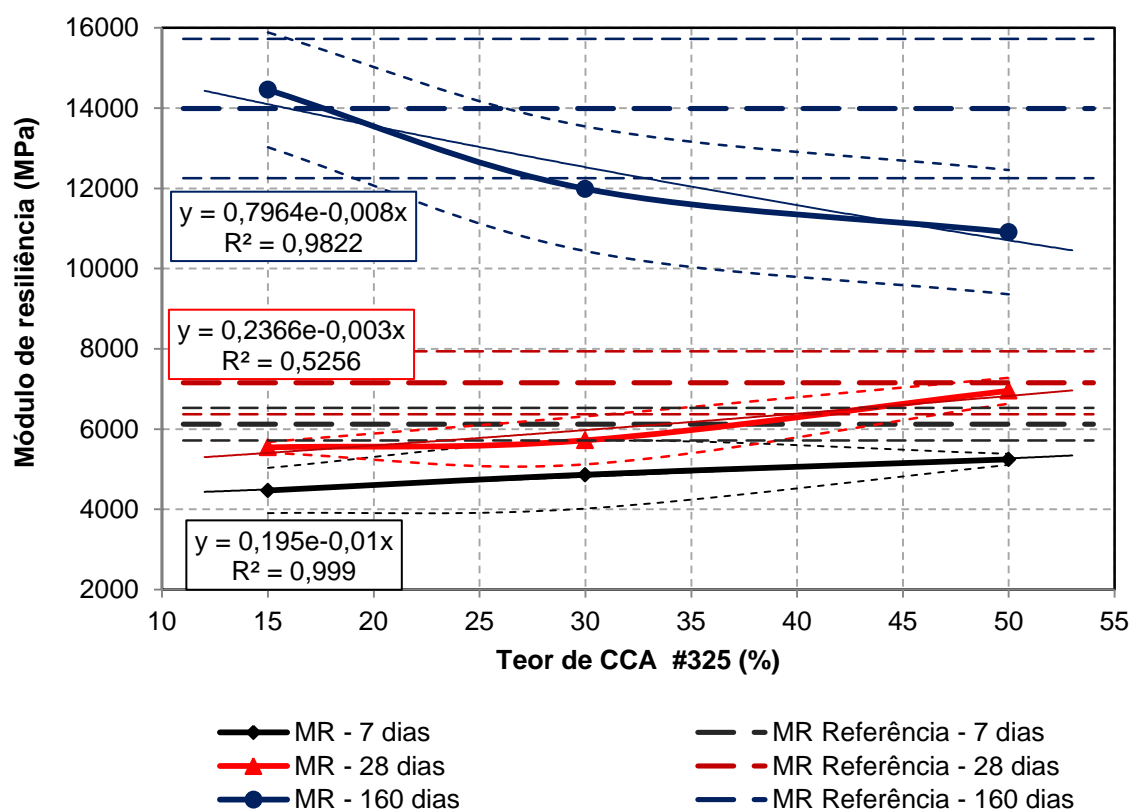


Figura 72 – Teor CCA #325 x MR (MPa)

As misturas com resultados mais próximos da referência com cimento ficaram por conta das amostras com 28 dias de cura e CCA #500. O aumento do MR de 7 para 160 dias variou de 100% a 300%, dependendo do caso.

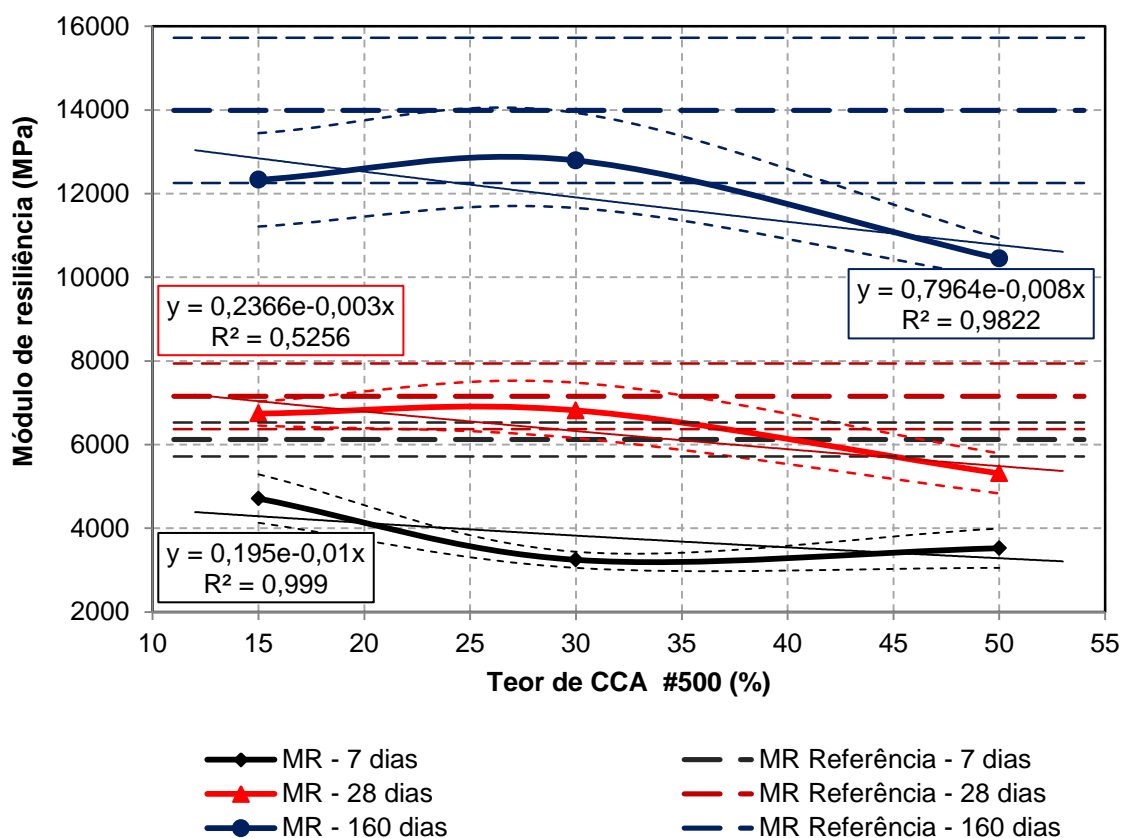


Figura 73 – Teor CCA #500 x MR (MPa)

Os valores de MR são apresentados na tabela 38, com suas taxas de variação calculadas. A análise dos resultados de MR é bastante complexa, uma vez que dependendo da estrutura onde será inserido o material, valores maiores ou menores são tolerados. Desta forma, é necessária uma compatibilização da rigidez entre as camadas que constituem o sistema.

As tabelas 39, 40 e 41 apresentam os resultados da relação MR/RT realizada para complementar os dados encontrados.

Tabela 38 – Taxas de variação nos ensaios de MR

| CCA | % | Dias de Cura | MR (MPa) | Variação da resistência em relação a Ref. (%) | Variação da resistência em relação aos 7 dias de cura (%) |
|------|----|--------------|----------|---|---|
| Ref. | - | 7 | 6122 | - | - |
| #325 | 15 | 7 | 4469 | -27,00% | |
| #325 | 30 | 7 | 4863 | -20,57% | |
| #325 | 50 | 7 | 5246 | -14,31% | |
| #500 | 15 | 7 | 4710 | -23,06% | |
| #500 | 30 | 7 | 3245 | -46,99% | |
| #500 | 50 | 7 | 3523 | -42,45% | |
| Ref. | - | 28 | 7154 | - | +16,86% |
| #325 | 15 | 28 | 5543 | -22,52% | +24,03% |
| #325 | 30 | 28 | 5719 | -20,06% | +17,60% |
| #325 | 50 | 28 | 6955 | -2,78% | +32,58% |
| #500 | 15 | 28 | 6743 | -5,75% | +43,16% |
| #500 | 30 | 28 | 6817 | -4,71% | +110,08% |
| #500 | 50 | 28 | 5311 | -25,76% | +50,75% |
| Ref. | - | 160 | 13990 | - | +128,52% |
| #325 | 15 | 160 | 14456 | +3,33% | +223,47% |
| #325 | 30 | 160 | 11989 | -14,30% | +146,54% |
| #325 | 50 | 160 | 10908 | -22,03% | +107,93% |
| #500 | 15 | 160 | 12330 | -11,87% | +161,78% |
| #500 | 30 | 160 | 12794 | -8,55% | +294,27% |
| #500 | 50 | 160 | 10777 | -22,97% | +205,90% |

Tabela 39 – Relação MR / RT – 7 dias

| Tipo CCA | Ref. | #325 | #325 | #325 | #500 | #500 | #500 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teor (%) | Ref. | 15% | 30% | 50% | 15% | 30% | 50% |
| MR (MPa) | 6122 | 4469 | 4863 | 5246 | 4710 | 3245 | 3523 |
| RTCD (MPa) | 0,224 | 0,168 | 0,143 | 0,117 | 0,192 | 0,139 | 0,137 |
| MR/RT | 27333 | 26614 | 34084 | 44672 | 24476 | 23290 | 25789 |

Tabela 40 – Relação MR / RT – 28 dias

| Dias de cura | Ref. | #325 | #325 | #325 | #500 | #500 | #500 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teor (%) | Ref. | 15% | 30% | 50% | 15% | 30% | 50% |
| MR (MPa) | 7154 | 5543 | 5719 | 6955 | 6743 | 6817 | 5311 |
| RTCD (MPa) | 0,277 | 0,234 | 0,196 | 0,212 | 0,284 | 0,230 | 0,264 |
| MR/RT | 25872 | 23678 | 29167 | 32765 | 23759 | 29677 | 20124 |

Tabela 41 – Relação MR / RT – 160 dias

| Dias de cura | Ref. | #325 | #325 | #325 | #500 | #500 | #500 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teor (%) | Ref. | 15% | 30% | 50% | 15% | 30% | 50% |
| MR (MPa) | 13990 | 14456 | 11989 | 10908 | 12330 | 12794 | 10447 |
| RTCD (MPa) | 0,894 | 0,729 | 0,656 | 0,580 | 0,672 | 0,659 | 0,467 |
| MR/RT | 15656 | 19839 | 18287 | 18821 | 18339 | 19402 | 22360 |

Ao trabalhar com misturas estabilizadas com cimento, foram obtidos corpos de prova de elevada rigidez. A relação MR/RT nos dá ideia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura. Misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a concentração de esforços em seu interior.

As tabelas mostram poucas diferenças entre amostras moldadas com diferentes finuras de CCA. Com o aumento dos dias de cura, as amostras apresentaram evolução nos valores de RT, fazendo com que a relação MR/RT diminuísse, aumentando a capacidade de absorção das energias de deformação. Em valores, de 7 para 160 dias, o MR dobrou e a RTCD teve crescimento de aproximadamente quatro vezes, já a relação MR/RT teve quedas de 15 a 60%. Apenas as amostras com 50% de CCA #500 apresentaram razão MR/RT maior que aos 28 dias, isso devido ao baixo crescimento da resistência à tração dos corpos de prova com 160 dias de idade, mesmo que o MR obtido destas tenha sido elevado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Nesta pesquisa, a avaliação mecânica apresentou resultados positivos ao desenvolver uma mistura com agregados virgens, de modo que a capacidade de suporte do material fosse aumentada. Ensaios de compactação e ISC realizados no fresado puro e na mistura elaborada (70% fresado + 30% agregado virgem), mostraram que a estabilização granulométrica teve crescimento de potencial em relação ao material fresado estabilizado mecanicamente. O ISC da mistura ficou três vezes maior que do fresado puro, afirmando que uma quantidade baixa de material adicionado eleva consideravelmente a capacidade de desempenho do material final. Resultados estes, ISC mistura BR-290 de 95% e para mistura ERS-569 de 68%, já tornam o material apto a ser aplicado em camadas de pavimentos, ao ser determinado ISC mínimo de 60% para bases em estruturas para tráfegos leves. O ISC do fresado puro ficou em 56% (BR-290) e 21% (ERS-569), podendo ser utilizado para sub-bases onde são indicados materiais com ISC acima de 20%.

Os resultados da estabilização granulométrica guiaram o trabalho para a estabilização química com utilização de cimento Portland pozolânico CP IV-32, escolhido por alcançar maiores resistências em idades avançadas. Os objetivos eram atingir resultados positivos de resistências à compressão e tração, e para que estas fossem maximizadas com o poder aglutinante do cimento. O cimento também proporcionou que pudessem ser moldados os corpos de prova, uma vez que não era possível a compactação e desmoldagem somente com os materiais da mistura.

Os teores encontrados de cimento Portland nas misturas ficaram em torno de 5%, ao encontrar resistência à compressão axial de 2,1 MPa aos 28 dias. Valores compatíveis com resultados encontrados na literatura, mas que ainda necessitam de uma avaliação econômica para afirmar sua viabilidade juntamente com a eficácia técnica.

Para os ensaios laboratoriais foram também avaliadas as melhorias que a cinza de casca de arroz fornece à mistura ao longo do tempo, alterando sua

resistência final e obedecendo aos requisitos das normas do DNIT para estabilização de bases e sub-bases para pavimentos flexíveis. As análises realizadas das amostras com cinza foram de método comparativo com os resultados das amostras de referência, moldadas apenas com cimento Portland para estabilização química:

- Ao romper os corpos de prova para resistência à compressão simples, foram obtidos aumentos significativos de 7 para 28 dias de idade;
- Os melhores desempenhos são observados com baixo teor de CCA (15%) e em sua malha mais fina, a CCA #500, pois ficaram mais próximos da referência de 100% de cimento Portland. Mas ao analisar a partir de cada referência, o ganho de resistência efetivo da CCA teve melhores resultados com 50% em ambas as CCA;
- Com as amostras em 160 dias não foi obtido desempenho satisfatório, apresentando resistência inferior, em alguns casos, as amostras ensaiadas aos 28 dias de idade;
- Os corpos de prova com 160 dias de idade apresentavam visualmente pouca umidade em seu interior, podendo então ter interferido diretamente no desempenho;
- Os melhores resultados foram encontrados nos ensaios de compressão diametral, com crescimento de até 3,5 vezes de RT ao comparar os resultados de 7 para 160 dias de idade;
- A resistência à tração em idade iniciais, 7 e 28 dias de idade, ficaram muito próximas dos resultados de referência com 100% de cimento Portland, destaque para 28 dias com CCA #500;
- Ao analisar a efetividade da CCA nas misturas, ficou evidente os melhores desempenhos na incorporação de 50% do material, assim como apresentados nos resultados de RCS;
- Para RCS e RT, a substituição de 15% de cimento por CCA se mostrou eficiente, não perdendo em resistência para as amostras de referência com 100% de cimento Portland;
- A relação entre RT e RCS, mostrou que para 7 e 28 dias a RT varia de 10% a 13% dos valores de RCS, já para 160 dias os valores ficaram em torno de

30%, devido ao desempenho destacado dos corpos de prova ensaiados a compressão diametral e também pelas baixas resistências encontradas de RCS;

- O resultados encontrados ao determinar o módulo de resiliência das amostras de referência, entre 6.000 e 12.000 MPa, ficaram de acordo com o citado por Bernucci *et al* (2008) para materiais graduados tratados com cimento. As amostras ficaram em aproximadamente 6.000 MPa para 7 dias, 7.000 MPa aos 28 dias e 14.000 MPa aos 160 dias de idade. Isso mostra o grande aumento da rigidez das misturas ao longo do tempo;

- Os corpos de prova moldados com CCA #325 apresentaram aumento do MR com maior teor da CCA aos 7 e 28 dias; e queda de 14.000 MPa (15% de CCA) para 11.000 MPa (50% de CCA) aos 160 dias. As misturas com resultados mais próximos da referência com cimento ficaram por conta das amostras com 28 dias de cura e CCA #500. O aumento do MR de 7 para 160 dias variou de 100% a 300%, dependendo do caso;

- A relação do MR/RT encontrada mostrou evolução positiva nos valores em idades avançadas de cura, aumentando a tenacidade das misturas. Isso ocorre devido ao crescimento atenuado da resistência à tração das amostras, sendo estes muito superiores ao crescimento do módulo de resiliência com o tempo; uma vez que a razão para 7 dias de idade das amostras variou de 26.000 até 44.000, caiu aos 160 dias para valores entre 15.000 e 22.000.

Ao realizar análise geral do que foi estudado, a estabilização granulométrica do fresado é de extrema importância, pois ensaios básicos de laboratório já demonstram o crescimento de desempenho destas misturas em uma simples compactação adequada. A estabilização química com cimento Portland se mostrou eficaz, uma vez que o material fresado já é um material envelhecido e necessita de tratamento com outros materiais para sua melhor aplicação. A cinza de casca de arroz vem com o apelo ambiental, pela menor quantidade de utilização do cimento, e o reaproveitamento deste material oriundo da casca de arroz com grande potencial pozolânico. A substituição de cimento em 15% de CCA se mostrou uma alternativa interessante, uma vez que a alteração da resistência foi mínima.

A análise realizada nos ensaios de RCS e RT, avaliando a real efetividade da CCA nas misturas, mostraram que no maior teor de utilização da CCA, de 50%, foram obtidos os melhores avanços. As amostras com maior teor da cinza

apresentaram maior variação nos resultados, sempre positivas. Essa análise colabora com a ideia de que as reações químicas entre cimento Portland e CCA ocorreram em maiores proporções, apresentando ganhos significativos na resistência dos corpos de prova.

Desta forma, e suportado pelos resultados laboratoriais apresentados, torna-se evidente o futuro promissor para utilização do material fresado, principalmente com o material fresado estabilizado mecânica e granulometricamente, que aliam de maneira inquestionável o quesito técnico e econômico, com a realização de ensaios mais simples e de resultados imediatos. O reaproveitamento destes materiais se torna de extrema importância pela constante intervenção nas rodovias brasileiras para qualquer tipo de conservação, que proporcionam toneladas de agregados com potencial de utilização desde que aplicados de forma correta.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sempre buscando o aperfeiçoamento da técnica e para dar continuidade ao presente trabalho propõem-se as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Estabilização do material fresado em outras proporções, focando o máximo de utilização deste material;
- A execução de segmentos experimentais, aliados aos ensaios em laboratório, para afirmar ainda mais o potencial de utilização do material;
- Analisar a estabilização química com outros tipos de cimento, como o CP II, por apresentar menor quantidade de pozolona na sua composição, o que possibilitaria mais reações com a CCA;
- Analisar a estabilização química com cal e CCA, uma vez que a sílica amorfa (SiO_2) presente em grande quantidade nas pozolanas como a CCA reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e a água, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H);
- Realizar ensaios triaxiais, a fim de obter resultados de módulo de resiliência da mistura estabilizada granulometricamente e do material fresado puro;

- Analisar em laboratório a influencia da temperatura. Seja esta na compactação como já foi citado durante o trabalho, ou para a execução dos ensaios como os triaxiais, de resistência à tração e determinação dos módulos resilientes nos materiais cimentados;
- Estudos que contemplem a viabilidade econômica da utilização parcial e total do material fresado, bem como a estabilização com cimento Portland e CCA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11803**: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013. 7p.

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

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

_____. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 6p.

ALHASSAN, Musa. **Potential of Rice Husk Ash for soil stabilization**. Assumption University of Thailand, AU J. T. 11(4): 246-250, 2008. Bangkok, Tailândia, 2008.

ALI, F. H.; ADNAN, A.; CHOY, C. K. **Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia with Rice Husk Ash as an Additive**. Geotechnical and Geological Engineering, v. 10, n. 2, p. 117–134, Amsterdam, Holanda, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4123**: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. Philadelphia, 1982. 4p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **State-of-the-Art Report on Soil Cement**. ACI 230.1 R-90, Farmington Hills, 1997.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **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.

BALBO, J.T.; BODI, J. Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: Alternativa para bases de elevado módulo de elasticidade. In: XVIII ANPET – CONGRESSO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2004.

BAPTISTA, A. M. C. **Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: Contribuição para seu estudo e aplicação.** 2006. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2006.

BEHAK, L. **Estabilização de um Solo Sedimentar Arenoso do Uruguai com Cinza de Casca de Arroz e Cal.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008. 504 p. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.

BESSA, Iuri S; et al. Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas à frio. In: 21ª ENCONTRO DO ASFALTO, 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2014.

BONFIM, V.; DOMINGUES A. A. Utilização de fresagem e reciclagem *in situ* a frio: alternativas na recuperação de pavimentos asfálticos. In: 29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1995, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, p. 603-621, 1995.

BONFIM, Valmir. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** 3 Ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2011.

BROSSEAUD, Yves. Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 2011, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2011.

BROWN BROWN. Brown Brown Brasil. **Histórico.** Paulínia, 2011. Disponível em: <http://www.brownbrown.com.br/site/?page_id=69>. Acesso em: 09 ago. 2014.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2003.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT. **Pesquisa Confederação Nacional dos Transportes de rodovias 2012.** Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Documents/Arquivos%202012/resumo_pd_2410.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2013.

DALLA ROSA, F.; JORGE, F.; MULLER, E. R. Estudo da adição de diferentes agentes estabilizadores na reciclagem de um pavimento na rodovia BR-116. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 42, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado, 2013.

DAVID, D. **Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2006.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do Comportamento de Material Fresado de Revestimento Asfáltico Visando sua Aplicação em Reciclagem de Pavimentos.** 2004, 110p. Tese de Doutorado - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DAER/RS – EL 108/01:** Determinação do Índice de Lamelaridade. Porto Alegre, 2001, 4 p.

_____. **DAER/RS – ES – P 16/1991:** Concreto Asfáltico. Porto Alegre, 1998, 21 p.

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

_____. **DNER-ES 301/97:** Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997, 7 p.

_____. **DNER-ES 303/97:** Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997, 7 p.

_____. **DNER-ME 035/98:** Agregados – determinação de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998, 6 p.

_____. **DNER-ME 049/94:** Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994, 14 p.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 083/98**: Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998, 5 p.

_____. **DNER-ME 084/95**: Agregado miúdo – determinação da densidade real. [S.l.], 1995, 3 p.

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

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

_____. **DNER-ME 162/94**: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994, 7 p.

_____. **DNER-ME 181/94**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994, 7 p.

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

_____. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro. 1996, 327p.

_____. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT-ES 031/2006**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006, 14 p.

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

_____. **DNIT-ES 167/2013**: Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2013, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT-ES 405/2013**: Pavimentação – reciclagem de pavimento à frio “in situ” com adição de espuma de asfalto. Rio de Janeiro, 2013, 9 p.

_____. **DNIT-ME 135/2010**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 6 p. Origem: DNER-ME 133/1994.

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

_____. **Manual de Pavimentação**. 3º ed. Rio de Janeiro, 2006, 274 p.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**, 2º Ed. Rio de Janeiro, 2006, 314 p.

DUART, M. A. Estudo da **Microestrutura do Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz Residual Sem Beneficiamento**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

EDEH, J. E.; ONCHE; OSINUBI, K. J. Rice husk ash stabilization of reclaimed asphalt pavement using cement as additive. In: STATE OF THE ART AND PRACTICE IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, GEO-CONGRESS 2012, Oakland. **Anais...** American Society of Civil Engineers, ASCE, Oakland, Estados Unidos, 2012.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Pavement Recycling Executive Summary and Report**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-95-060, Washington, D.C. Março, 1996.

GENCER, Selim E.; et al. A new method for hot recycling of asphalt. In: 5TH EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 2012, Istanbul. **Anais...** Istanbul, Turquia, 2012.

GUYER, J.Paul; P. E.; R. A. **Introduction to soil stabilization in pavements**. 2011. 28f. Continuing Education and Development, New York. Nova Iorque, Estados Unidos, 2011. Notas de aula.

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

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Butterworths, Melbourne, 1972. 374p.

ISAIA, G. C. *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte II: Propriedades da durabilidade. In: CINPAR 2010, Córdoba. **Anais...** Córdoba, Argentina, 2010.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R. S.; TUCHUMANTEL JR, O. Cold In Situ Recycling – ReciFlex – at SP-147. In: 2005 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT RECYCLING, 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2005.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574 p. 2005.

MOTA, E. P. F.; BUENO, B. S. Panorama da melhoria de solos no Brasil. In: IV Congresso Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2003.

OLIVEIRA, A.; BARAN, K. R.; SCHMIDT, F. S.. Reciclagem de pavimento para restauração da BR 282 em Santa Catarina – estudo de caso. In: 40ª RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2010.

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

PCA - Portland Cement Association. **Histórico**. Washington, 2013. Disponível em: <http://www.cement.org/pavements/pv_sc_fdr.asp>. Acesso em: 21 jan. 2013.

PINTO, M. M.; CERVO T. C.; PEREIRA, D. S. Reutilização de material fresado em acostamentos como agente regularizador e nivelador. **Revista Pavimentação**. v.6, p.18-25, 2012.

PRIETTO, Pedro Domingues Marques; et al. Avaliação experimental de solos quimicamente estabilizados para utilização em bases de estradas de baixo volume de tráfego. In: 15º CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010, Gramado. **Anais...** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – ABMS, Gramado, 2010.

SACHET, Taís; GONÇALVES, Fernando Pugliero. Reciclagem de bases granulares para pavimentos asfálticos. In: 39ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2008, Recife. **Anais...** Recife, 2008.

SCHENDEL, Cristian; et al. Novas alternativas de materiais em vias de pavimentação. In: IV SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 2012, Bagé. **Anais...** Unipampa, Bagé, 2012.

SILVA, C. A. R. da; MIRANDA JÚNIOR, C. Reciclagem de Camada Betuminosa como Sub-Base Estabilizada com Cimento na BR-381: Uma Experiência. In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2000, Brasília. **Anais...** Brasília, Volume II, p. 488-497, 2000.

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

SOKOLOVICZ, B. C. **Microestrutura e Durabilidade a Cloretos de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz com e sem Moagem Prévia.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

TAHA, Ramzi; et al. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavements aggregate for road bases and subbases. **Journal of Materials in Civil Engineering.** Miami, Maio/Junho, p. 239-245, 2002.

TEREX, Roadbuilding (2007). **Histórico da evolução das usinas de asfalto.** Disponível em: <http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/3encontroTecnico/Historico eCalibragemdeUsinasTEREX.pdf>. Acesso em 12 de Setembro de 2012.

TRICHÊS, G.; LORENA, M.; SANTOS, A. Reciclagem de pavimento com adição de cimento: estudo do desempenho da rodovia SC 303, trecho BR 282 - Capinzal (SC). 40ª RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2010.

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

VAN IMPE, W. F. **Soil Improvement:** Techniques and their Evolution. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1989. 125 p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** 1 Ed. São Paulo: Mcgraw – Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

VIAS CONCRETAS. **Histórico.** São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://viasconcretas.com.br/tecnologia/fast-tracking/>>. Acesso em: 09 ago. 2014.

WIRTGEN, Wirtgen Group. **Histórico.** Windhagen, 2012. Disponível em: <<http://www.wirtgen-group.com/en/>>. Acesso em: 27 nov. 2012.

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