

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BRUNO RODRIGUES RIBEIRO

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E QUÍMICA DE MATERIAL
FRESADO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM
CAMADAS DE PAVIMENTO**

**Alegrete
2017**

BRUNO RODRIGUES RIBEIRO

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E QUÍMICA DE MATERIAL
FRESADO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM
CAMADAS DE PAVIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Maurício Silveira dos Santos

**Alegrete
2017**

BRUNO RODRIGUES RIBEIRO

**ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E QUÍMICA DE MATERIAL
FRESADO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM
CAMADAS DE PAVIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26, junho de 2017.

Banca examinadora:

Maurício Silveira dos Santos

Prof. Me. Maurício Silveira dos Santos
Orientador
UNIPAMPA

Jaelson Budny

Prof. Me. Jaelson Budny
UNIPAMPA

Fernando D. Boeira

Prof. Me. Fernando Dekeper Boeira
UFSM

AGRADECIMENTOS

Primeiro de tudo, gostaria de agradecer a Deus por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com meus objetivos e não desanimar perante as dificuldades. Agradeço a Ele por manter a minha mãe ao meu lado.

Ao professor Maurício Silveira dos Santos, orientador deste trabalho, pela oportunidade, por toda dedicação, pelos ensinamentos, orientações e incentivo durante o período da pesquisa. Agradeço por me ajudar a enxergar pontos a serem melhorados no trabalho e na minha organização pessoal. Agradeço sinceramente por ter me aceitado como seu aluno, por toda paciência e tenho a plena certeza de que sem a presença deste professor não seria possível chegar ao fim do semestre com os objetivos deste estudo atingidos. Obrigado mestre!

Agradeço a todos os funcionários da Universidade Federal do Pampa, em especial ao engenheiro Marcelo de Jesus Dias de Oliveira e a técnica Raquel dos Santos Machado, por não medirem esforços ao me ajudarem, pela atenção e auxílio durante minhas atividades no laboratório de Eng. Civil.

Aos membros da banca, professor Jaelson Budny e professor Fernando Dekeper Boeira, pela gentileza em aceitar o convite para examinarem este trabalho e pela compreensão.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM pela atenção e orientação na realização dos ensaios e aos técnicos envolvidos.

Ao professor e amigo Telmo Deifeld pelo incentivo a vida acadêmica e pela força e bons conselhos nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu irmão e futuro engenheiro civil Everton Soares, pela amizade, força, carinho e por me estender a mão quando eu preciso. Sem você esse trabalho não seria possível.

Agradeço ao meu irmão e engenheiro civil Bento Bicca, pela amizade, ensinamentos constantes e pelo apoio em todas minhas aventuras. Por acreditar em mim e tornar o sonho da minha graduação possível, por tornar menos dolorosa as dificuldades enfrentadas em Alegrete e por me fazer parte da tua família.

Por fim, agradeço e dedico este trabalho ao meu Pai, que esteve presente em todos os momentos em meu pensamento, o senhor foi e segue sendo meu maior incentivador. Gratidão ao senhor Pai.

RESUMO

O transporte rodoviário está diretamente ligado com o desenvolvimento econômico de uma região produtora. No Brasil o transporte de cargas se concentra através deste modal. Logo se torna necessário que as rodovias apresentem um bom estado de conservação, pois além de contribuir com a segurança, são de extrema importância no desenvolvimento do país. Devido a importância do transporte rodoviário na movimentação de bens e pessoas, é necessário investimento na manutenção e recuperação da malha rodoviária pavimentada. Nesse sentido, pesquisadores estão sempre em busca de novas alternativas para através do melhor aproveitamento de materiais, reduzirem custos com restaurações e construções de pavimento. A carência de agregados em algumas regiões aumenta consideravelmente os valores dos serviços de pavimentação, devido ao custo de transporte. Desta forma torna-se viável o estudo do reaproveitamento do material oriundo da fresagem de revestimentos asfálticos, pois além da preservação da fonte de agregados naturais é necessário a busca de soluções para destinação final deste material. Esta pesquisa procurou avaliar a aplicação do material fresado em camadas de base e sub-base de pavimentos com a estabilização química utilizando cimento Portland e materiais granulares. Para isso foi realizado ensaios de caracterização do material fresado e agregados, bem como ensaios mecânicos na mistura. O material fresado é oriundo da BR-290, a realização da estabilização granulométrica foi feita com teor de 60% de material fresado e 40% de agregado natural. A estabilização química foi feita com a adição de diferentes teores de cimento Portland CP-IV 32. Foram produzidas misturas com 2,0%, 3,5% e 5% de cimento. Para ensaio de resistência a compressão simples foi utilizado corpos de prova com dimensões de 10x20cm. Foram moldados corpos de prova de 10x6,3cm para ensaios de resistência a tração por compressão diametral e módulo de resiliência. Os corpos de prova foram encaminhados para uma câmara úmida por 7 e 28 dias. A análise dos resultados mostrou que a mistura com o teor de 5% a 28 alcançou as resistências prescritas pelas normas e literaturas existentes.

Palavras-chave: material fresado, estabilização química; estabilização granulométrica.

ABSTRACT

O Road transport is directly linked to the economic development of a producing region. In Brazil the transport of cargo is concentrated through this modal. Soon, it becomes necessary that the highways present a good state of conservation, since besides contributing with the security, they are of extreme importance in the development of the country. Due to the importance of road transport in the movement of goods and people, it is necessary to invest in the maintenance and recovery of the paved road network. In this sense, researchers are always in search of new alternatives for the better use of materials, reduce costs with restorations and pavement constructions. The lack of aggregates in some regions increases considerably the values of paving services, due to the cost of transportation. In this way it becomes feasible to study the reuse of the material coming from the milling of asphaltic coatings, since in addition to the preservation of the source of natural aggregates it is necessary to search for solutions for final destination of this material. This research sought to evaluate the application of the milled material in base layers and sub-base of pavements with the chemical stabilization using Portland cement and granular materials. For this purpose, characterization tests of the milled material and aggregates were carried out, as well as mechanical tests in the mixture. The milled material comes from the BR-290, the particle size stabilization was done with 60% of milled material and 40% of natural aggregate. The chemical stabilization was done with the addition of different levels of Portland cement CP-IV 32. Mixtures with 2.0%, 3.5% and 5% of cement were produced. For test of resistance to simple compression was used test pieces with dimensions of 10x20cm. 10x6.3 cm specimens were tested for tensile strength tests by diametrical compression and resilience modulus. The specimens were sent to a humid chamber for 7 and 28 days. The analysis of the results showed that the mixture with the content of 5% to 28 reached the resistances prescribed by the existing norms and literature.

Keywords: milled material, chemical stabilization; Granulometric stabilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corte transversal de um pavimento flexível	18
Figura 2 – Pressões verticais com a profundidade.....	20
Figura 3 – Tensões em uma estrutura de pavimento	24
Figura 4 – Fresadora de pequeno porte.....	30
Figura 5 – Fresadora de médio porte	30
Figura 6 – Fresadora de grande porte.....	31
Figura 7 – Tambor com fresas da máquina fresadora.....	32
Figura 8 – Desenho esquemático do dente de corte (medidas em milímetros)	34
Figura 9 – Cilindro de microfresagem	34
Figura 10 – Rugosidade após a fresagem na pista.....	36
Figura 11 – Curvas granulométricas do material com velocidade 3m/minuto	37
Figura 12 – Curvas granulométricas do material com velocidade 10m/minuto	38
Figura 13 – Sentido do giro do cilindro fresador.....	38
Figura 14 – Esquema do equipamento de reciclagem a quente no local	41
Figura 15 – Esquema de processo de reciclagem a quente em central.....	42
Figura 16 – Usina intermitente com material introduzido no receptáculo de pesagem	43
Figura 17 – Usina “ <i>drum mixer</i> ” na reciclagem a quente.....	45
Figura 18 – Dispositivo de reciclagem a frio “ <i>in situ</i> ”	46
Figura 19 – Usina de reciclagem a frio.....	46
Figura 20 – Estados físicos das misturas solo-agregado	50
Figura 21 – Estados físicos das misturas cimento	58
Figura 22 – Corpos de prova para RCS com diferentes teores de cimento	59
Figura 23 – Corpos de prova para RTCD/MR com diferentes teores de cimento ...	59
Figura 24 – Material fresado seco	60
Figura 25 – Gráfico da distribuição granulométrica das amostras de material fresado	61
Figura 26 – Aparelho extrator de betume	61
Figura 27 – Gráfico da distribuição granulométrica dos agregados	63
Figura 28 – Comparativo granulometria dos materiais e faixa B DNIT.....	65
Figura 29 – Projeto de estabilização granulométrica mistura 60/40	66

Figura 30 – Curva de compactação para mistura 60/40.....	67
Figura 31 – Execução do ensaio de compactação.....	68
Figura 32 – Execução do ensaio de compressão simples	70
Figura 33 – Esquema ensaio de compressão diametral	71
Figura 34 – Execução ensaio de compressão diametral.....	72
Figura 35 – Execução ensaio de módulo de resiliência.....	74
Figura 36 – Valores da resistência à compressão média das misturas	76
Figura 37 – Comparativo das resistências de compressão simples.....	78
Figura 38 – Valores médios da resistência a tração por compressão diametral.....	80
Figura 39 – Comparativo das resistências de tração por compressão diametral.....	81
Figura 40 – Amostra rompida por compressão diametral.....	82
Figura 41 – Irregularidades do corpo de prova.....	83
Figura 42 – Valores médios módulo de resiliência	85
Figura 43 – Comparativo dos módulos de resiliência.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para base e sub-base estabilizados granulometricamente	22
Tabela 2 – Parâmetros para base e sub-base de solo melhorado com cimento	23
Tabela 3 – Montantes e valores das misturas asfálticas retiradas de pavimentos em São Paulo	28
Tabela 4 – Número de corpos de prova para determinação do teor de cimento	58
Tabela 5 – Distribuição granulométrica das amostras de material fresado	60
Tabela 6 – Teor de betume	62
Tabela 7 – Características tecnológicas dos agregados	62
Tabela 8 – Distribuição granulométrica dos agregados	63
Tabela 9 – Especificação granulométrica para bases estabilizadas – DNIT 141/2010	64
Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de compactação da mistura.....	68
Tabela 11 – Dosagem dos corpos de prova ensaiados	68
Tabela 12 – Resultados médios de resistência à compressão.....	75
Tabela 13 – Taxa de crescimento da resistência à compressão (%).....	77
Tabela 14 – Carga de ruptura média e RTCD.....	79
Tabela 15 – Taxa de crescimento da RTCD (%).....	80
Tabela 16 – Relação RCS para RTCD.....	82
Tabela 17 – Módulo de resiliência.....	84
Tabela 18 – Taxa de crescimento do MR (%).....	85
Tabela 19 – Relação MR/RT.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARRA – Asphalt Recycling and Reclaiming Association

CAP – Cimento asfáltico de petróleo

CBR - California Bearing Ratio

DNER – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNIT - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

FHWA - Federal Highway Administration

ISC - Índice de Suporte Califórnia

MR – Módulo de resiliência

NBR - Norma brasileira

RAP - Recycled/Reclaimed asphalt pavement

RCS - Resistência à compressão simples

RT - Resistência à tração

RTCD - Resistência à tração por compressão diametral

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo Geral.....	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Pavimento	17
2.1.1 Pavimento Flexível	17
2.2 Camada de Base e Sub-base de pavimento.....	20
2.2.1 Comportamento mecânico dos materiais de base e sub-base	23
2.2.2 Utilização de resíduos em camadas de base e sub-base	25
2.3 Fresado Asfáltico	27
2.3.1 Equipamentos de fresagem e seus componentes	29
2.3.1.1 Máquina fresadora.....	29
2.3.2 Processo de produção do fresado asfáltico	33
2.3.3 Classificação dos tipos de fresagem.....	34
2.3.4 Granulometria do material fresado	36
2.4 Reciclagem de pavimentos	39
2.4.1 Reciclagem a quente.....	40
2.4.1.1 Reciclagem a quente “in situ”	40
2.4.1.2 Reciclagem a quente em usina	42
2.4.2 Reciclagem a frio.....	44
2.4.2.1 Reciclagem a frio “in situ”	45
2.4.2.2 Reciclagem a frio em usina	46
2.4.3 Reciclagem profunda	47
2.4.4 Estabilização de camadas de pavimentos	47
2.4.4.1 Estabilização de mecânica	48
2.4.4.2 Estabilização granulométrica	49
2.4.4.3 Estabilização química	52
2.4.4.3.1 Estabilização química com cimento	53
2.4.4.3.2 Estabilização química com cal.....	54
3 MATERIAIS E METODOS	57
3.1 Introdução.....	57
3.2 Planejamento da pesquisa	57

3.3 Materiais.....	59
3.3.1 Material fresado.....	59
3.3.2 Agregados.....	62
3.3.3 Cimento Portland	63
3.4 Procedimentos	64
3.4.1 Estabilização granulométrica.....	64
3.4.2 Compactação.....	67
3.4.3 Resistência à compressão simples (RCS)	69
3.4.4 Resistência à tração por compressão diametral (RTCD).....	70
3.4.4 Módulo de resiliência (MR).....	72
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	75
4.1 Resistência à Compressão Simples	75
4.2 Resistência à tração por compressão diametral	78
4.3 Módulo de Resiliência.....	83
5 CONCLUSÕES	89
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO

O transporte está entrelaçado com o desenvolvimento da civilização moderna. Ele serve de instrumento básico de fomento para o desenvolvimento econômico de uma região, onde sua indisponibilidade pode inviabilizar uma região produtora, mesmo com demanda desses produtos em outros locais (RODRIGUES, 2014).

No Brasil até a década de 30 as ferrovias eram responsáveis pela totalidade do transporte terrestre de carga e passageiros. Entretanto, devido a programas governamentais que passaram a dar prioridade à implantação de rede rodoviária e ao desenvolvimento da indústria automobilística, o transporte rodoviário sofreu um grande desenvolvimento tecnológico acarretando a retração das outras modalidades (GRAIN, 1985).

As estradas têm sido e continuam a ser a espinha dorsal da rede de transporte terrestre, possibilitando a mobilidade necessária para suportar o crescimento econômico. Os meios de transporte com o decorrer do tempo se tornaram mais rápidos e avançados, possibilitando que as atividades econômicas crescessem no mesmo ritmo, multiplicando a importância das estradas para sociedade. Porém, da mesma forma cresce os impactos adversos das rodovias oriundos do desenvolvimento rodoviário, principalmente quando o planejamento, o projeto e a construção são feitos de forma inadequada. O estudo da engenharia de rodovias deve ir além de cobrir aspectos estruturais e funcionais, necessitando focar aspectos como impactos ambientais e sócio-econômicos do desenvolvimento da rede rodoviária, explorando-a de forma completa e minimizando as possíveis influências adversas (FWA, 2006).

As rodovias e pavimentos, devido a importância do transporte no contexto da atividade socioeconômica, devem apresentar permanentemente um desempenho satisfatório a longo prazo. Tal desempenho se traduz na oferta, ao usuário, de condições de tráfego segura, confortável e econômica, se adequando aos princípios de otimização do custo total de transporte (DNIT, 2006).

As rodovias em bom estado de conservação são de extrema importância no desenvolvimento do país, pois contribuem para a redução de acidentes e a sustentabilidade. Nesse sentido, entende-se que uma malha rodoviária inadequada aumentará o tempo de viagem, elevando o custo operacional dos veículos, trazendo mais riscos aos usuários aumentando a emissões de poluentes no ar (CNT, 2016).

No Brasil existem 1.720.756 km de rodovias, onde apenas 211.468 km são pavimentadas, o que representa 12,3% da malha. Além da reduzida extensão de rodovias, outros problemas são observados em relação à qualidade das vias pavimentadas existentes (CNT, 2016).

Segundo a pesquisa realizada pela CNT em Rodovias 2016, foram avaliados 103.259 quilômetros de rodovias pavimentadas, e em 58,2% da extensão total pesquisada constatou-se algum tipo de deficiência no pavimento, na sinalização ou na geometria da via.

A má qualidade das rodovias, causada em partes pela inadequada manutenção, apresentam riscos aos usuários, além de encarecer os custos nas operações dos veículos e a restauração dos pavimentos. Dada a importância do transporte rodoviário na movimentação de bens e pessoas, é necessário investimento na manutenção e recuperação da malha rodoviária pavimentada (CNT, 2014).

A idade dos pavimentos e o tráfego intenso compõe o problema, especialmente nas rodovias federais, onde a maior parte da malha já ultrapassou a vida útil dos projetos originais (DNIT, 2006). Para Medina e Motta (1975) o trincamento por fadiga do revestimento e a deformação permanente correspondem, em geral, o mecanismo principal de degradação dos pavimentos asfálticos que mais afetam a serventia das rodovias ao longo de sua vida de serviço.

Este fenômeno, segundo Balbo (2007), relaciona-se a solicitação repetitiva de esforços em um material em níveis de tensão inferior ao de ruptura, que aos poucos modificam sua estrutura interna ocasionando a perda de suas características originais.

Para manter o nível de serviço dos pavimentos nos últimos anos, a ênfase na construção rodoviária vem sendo transferida para recuperação e restauração (DNIT, 2006). A fresagem de pavimentos asfálticos é constantemente aplicada nas técnicas de restauração de pavimentos deteriorados, obtendo-se como material resultante um agregado em forma granular envolto por um ligante envelhecido, que pode ser reutilizado pela reciclagem como material de pavimentação (BONFIM, 2007).

A fresagem trata-se da intervenção em que é realizado o corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento asfáltico (DNIT, 2011). Bonfim (2007) complementa que a fresagem ocorre por meio mecânico executado a quente ou a frio em uma superfície e com espessura pré-determinada.

A carência de agregados em algumas regiões do território brasileiro aumenta consideravelmente os valores dos serviços de pavimentação, isso se deve às grandes

distâncias de transportes entre as jazidas e as obras rodoviárias (SANTOS, 2008). A introdução do material granular obtido no processo de fresagem, como alternativa de uso em obras rodoviárias tem como objetivo suprir essa carência possibilitando uma redução de custos.

Todavia, não apenas questões econômicas norteiam esse estudo, mas também questões ambientais, em processos de restauração de pavimento grande parte dos materiais utilizados correspondem a agregados de diversas granulometrias, com a aplicabilidade do material obtido da fresagem se reduz a exploração de jazidas naturais, já tão escassas em algumas regiões do país (BRASILEIRO, 2013).

Além da preservação da fonte de agregados naturais a reutilização do material fresado reduziria o emprego de áreas para aterro e depósitos de resíduos, visto que este material é produzido em abundância no mundo, como nos EUA onde se gerou 41 milhões de toneladas de resíduo da manutenção de rodovias (HOLTZ; EIGHMY, 2000).

Esta pesquisa tem como pontos a serem respondidos referentes a utilização de material fresado em camadas de base e sub-base de pavimentos com a estabilização química utilizando cimento Portland e materiais granulares. Por se tratar de um material obtido em grande quantidade nas obras de restauração de pavimentos, se justifica o reuso do resíduo da fresagem na reciclagem de rodovias e por consequência o conhecimento das suas propriedades mecânicas.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento do material fresado estabilizado granulometricamente e quimicamente para aplicação em camadas de base e sub-base para pavimentos flexíveis. O estudo foi conduzido por meio de ensaios laboratoriais analisando também o comportamento do material quando estabilizado quimicamente com cimento Portland.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos serão obtidos a partir dos ensaios laboratoriais e estão citados a seguir:

- a) Caracterizar e avaliar as propriedades físicas do material fresado obtido na rodovia BR 290 e estabiliza-lo granulometricamente com agregado natural.
- b) Avaliar o teor de cimento adequado utilizado nas misturas de material fresado com agregado natural, por meio do estudo das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios de Resistência a Compressão Simples.
- c) Avaliar a Resistência à Compressão Simples (RCS), a Resistência a Tração por Compressão Diametral (RTCD) e o Módulo de Resiliência (MR) para as misturas com diferentes dosagens de cimento Portland.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pavimento

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, pavimento trata-se da supraestrutura formada de um sistema de camadas sobrepostas de espessuras finitas, assentadas sobre um semi-espaço considerado na teoria como infinito (infraestrutura ou terreno de fundação) que é denominada subleito (DNIT,2006).

Os pavimentos são estruturas construídas sobre a terraplanagem que tem como objetivo técnico e econômico: resistir aos esforços verticais obtidos pelo tráfego de veículos e distribuí-los; possibilitar comodidade e segurança as condições de rolamento; e resistir aos esforços horizontais permitindo uma maior durabilidade da superfície de rolamento (SENÇO, 2008).

Senço (2008) menciona que os pavimentos podem ser classificados em rígidos e flexíveis, segundo o autor rígido são aqueles pouco deformáveis e constituídos principalmente por cimento, já os flexíveis são aqueles que suportam certa deformação sem rompimento. Balbo (2007) complementa que estes termos dizem respeito não só às repostas estruturais dos materiais isoladamente, mas também às repostas estruturais do pavimento como um todo, sendo inadequado classificar um pavimento utilizando seu revestimento como referência, pois se impõe à resposta estrutural isolada de um material. Quando se deseja classificar um pavimento de acordo com o tipo de material presente no revestimento o autor propõe o emprego da expressão pavimento asfáltico e pavimento de concreto.

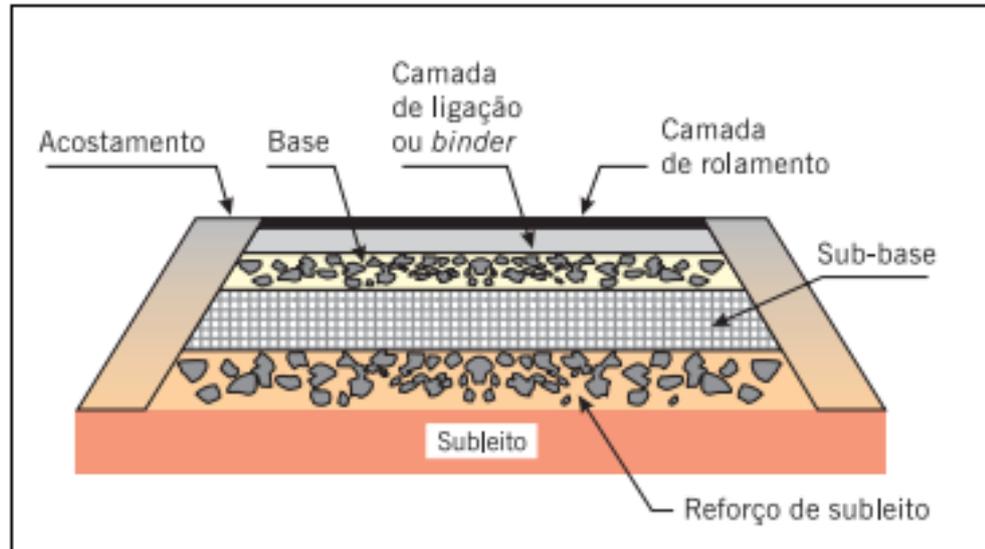
2.1.1 Pavimento Flexível

Segundo Yoder e Witczak (1975) o pavimento flexível quando submetido a uma determinada deformação, até certo limite, não irá romper. Balbo (2007) explica que tradicionalmente este tipo de pavimento é dimensionado a compressão e a tração na flexão, ocasionada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que acarretam em deformações definitivas.

Branco et al. (2008) definem as camadas constituintes de um pavimento flexível, sendo a superior composta por um material betuminoso, geralmente betume

asfáltico. As demais camadas inferiores são constituídas por material granular, chamadas de base, sub-base, reforço do subleito e subleito. O modelo estrutural de um pavimento flexível está apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Corte transversal de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 10)

Senço (2008) define o subleito como o terreno de fundação do pavimento. Balbo (2007) narra que as camadas do pavimento estão assentadas sobre o subleito, desta forma os esforços descarregados nesta camada irão ser dissipados em sua profundidade, geralmente no primeiro metro, por isso deve-se ter maior atenção em seu estrato superior onde as forças agirão com maior magnitude.

O reforço do subleito é uma camada de espessura constante e é empregada, caso necessário, acima do subleito (SENÇO, 2008). Balbo (2007) justifica seu uso quando a camada de fundação da estrutura do pavimento apresenta uma pequena resistência a esforços verticais. Desta forma, conforme o autor, no reforço do subleito é utilizado material com capacidade de resistir superior ao do subleito, reduzindo as pressões das cargas aplicadas no pavimento e chegando ao subleito com a amplitude compatível com sua resistência.

Balbo (2007) salienta ainda que o emprego do reforço de subleito não é obrigatório, já que as espessuras maiores das camadas superiores aliviarão as tensões em um subleito com baixa resistências, porém do ponto de vista econômico, o emprego do reforço reduz as camadas de base e sub-base, sendo em geral mais

econômico o emprego de solos de reforço do que maiores espessuras de camadas granulares.

A sub-base é uma camada do pavimento que deverá possuir característica tecnológica superior ao do reforço do subleito e inferior ao da base (SENÇO, 2008). Balbo (2007) explica que quando se é necessária uma camada muito espessa de base para dissipar as pressões nas camadas inferiores, procura-se por razões econômicas dividi-la, criando-se assim a sub-base.

A camada denominada base é responsável por resistir aos esforços de tráfego e distribuí-los (DNIT, 2010). Balbo (2007) complementa que a camada de base além de aliviar os esforços verticais para as camadas inferiores, ela tem papel importante na drenagem subsuperficial dos pavimentos. O autor destaca que sob esta camada é executado o revestimento.

O revestimento é a camada que possui a menor espessura do pavimento. Bernucci et al.(2008) esclarecem que esta camada deverá, dentre outras funções, receber a carga dos veículos e estará exposta diretamente a ação climática, por estes motivos deve ser constituída por material com boas condições de impermeabilidade e resistentes aos esforços oriundos do contato pneu pavimento. Os autores esclarecem que na maioria dos pavimentos brasileiros são utilizados como revestimento uma mistura de agregado mineral de diferentes granulometrias e variadas fontes que combinadas com ligantes asfálticos garante os requisitos necessários. De acordo com o tráfego e os materiais disponíveis e por razões técnicas construtivas, Balbo (2007) descreve que os revestimentos podem ser divididos em duas camadas de diferentes materiais, formando uma camada de rolamento que está diretamente em contato com as cargas e com as ações ambientais e por uma camada de ligação constituída de mistura asfáltica e localizada entre a camada de rolamento e a base do pavimento.

Para Senço (2008, p. 20), “na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço de subleito”.

Balbo (2007) explica que os materiais empregados nas camadas dos pavimentos são os responsáveis pelas respostas estruturais do pavimento em reação aos esforços das rodas dos veículos, destacando que ocorrem solicitações de tensões verticais, flexão, compressão horizontal (confinamento) e cisalhamento.

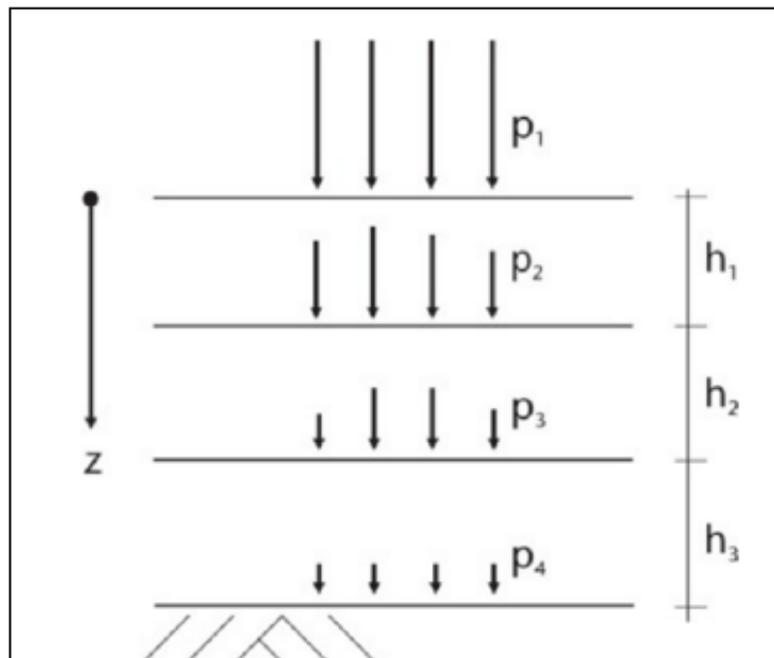
Quando o pavimento é submetido a uma carga de roda de veículo, ele distribui as tensões entre as camadas inferiores, gerando no revestimento e na base uma

tendência de dobramento do material empregado em tais estratos, fenômeno este denominado flexão (BALBO, 2007).

As cargas aplicadas na superfície do pavimento são dissipadas ao longo de sua profundidade e de suas camadas, de forma que analisando um determinado ponto da estrutura, a pressão vertical atuante possuirá magnitude superior do que em pontos inferiores. Essa distribuição de pressões não é uniforme, todavia para finalidades práticas, é considerada uniforme (BALBO, 2007).

A Figura 2 ilustra as pressões verticais com a profundidade.

Figura 2 – Pressões verticais com a profundidade



Fonte: Adaptado de Balbo (2007)

2.2 Camada de Base e Sub-base de pavimento

Branco et al. (2008) comentam que ao longo de uma rodovia se encontram diversos terrenos de natureza litológica diferentes e trechos com variações acentuadas de resistência. Segundo o autor o terreno de fundação de um pavimento não possui capacidade resistente para suportar os esforços verticais do tráfego de veículos, para isso utiliza-se camadas que irão aliviar as pressões e transmiti-las ao subleito com magnitude compatível. Nesse contexto surgem os estratos denominados base e sub-base.

Essas camadas são de grande importância para o pavimento pois estão diretamente ligadas com a qualidade e durabilidade das rodovias, a base e sub-base asseguram a capacidade de suporte necessária para o bom funcionamento estrutural do pavimento em um longo prazo. Na sua composição é necessário o uso de materiais com boas características mecânicas e que suportem a ação do tráfego sem apresentar grandes deformações (QUEIROZ, 2011).

As bases e sub-bases podem ser compostas por solo estabilizado naturalmente ou quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, misturas de solos e agregado, brita graduada, brita graduada tratada com cimento e concretos (BALBO, 2007). Bernucci et al. (2008) classificam os materiais da composição das camadas de base e sub-base como materiais granulares e solos, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados, e materiais asfálticos.

Os materiais granulares são aqueles que não resistem a esforços de tração e não possuem coesão (BERNUCCI et al.2008). Trata-se de materiais com estabilizações puramente mecânica por efeito de compressão e adensamento dos materiais constituintes (BALBO, 2007). Na pavimentação os materiais considerados granulares e solos são: brita graduada simples, bica corrida, macadame hidráulico, macadame seco, misturas estabilizadas granulometricamente, solo-agregado, solo natural ou melhorado com cimento e cal (BERNUCCI et al.2008).

Quando um material granular ou solo recebe a adição de cimento, cal ou outro aditivo é chamado de cimentado. Bernucci et al.(2008) explicam que o objetivo desta adição é obter um aumento na rigidez do material natural e um aumento na resistência a compressão e tração.

As misturas asfálticas e solo-asfalto ocorrem pela ligação dos agregados e partículas através dos ligantes asfálticos, assim podendo ser classificados como coesivos, adquirindo também uma resistência a tração superior ao dos solos argilosos. As misturas para bases asfálticas são: solo-asfalto, solo-emulsão, macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado (BERNUCCI et al.2008).

Bernucci et al. (2008) ressaltam sobre o uso crescente de materiais decorrentes da reciclagem na pavimentação, como a escória de alto-forno, agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições, misturas asfáltica fresada entre outros.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, através da Norma DNIT 141/2010 e Norma DNIT 139/2010 define os parâmetros de aceitação

dos materiais de base e sub-base estabilizadas granulometricamente, que são a combinação de solos, mistura de solos e materiais britados, com a compactação adequada, que tem por finalidade obter propriedades de estabilidade e durabilidade desejadas.

Através da Norma DNIT 142/2010 e Norma DNIT 143/2010 foram estabelecidas as sistemáticas empregadas no uso de base e sub-base melhorados com cimento. Esta técnica trata-se da mistura de solo, cimento e água com quantidades dosadas em laboratório visando o aumento de resistência e durabilidade. O DNIT cita que os teores de cimento usuais são de 2 a 4%, em peso, em relação do total da mistura.

A Tabela 1 apresenta as condições específicas dos materiais utilizados para a base estabilizada granulometricamente, conforme Norma DNIT 141/2010 – ES, e para sub-base estabilizada granulometricamente conforme Norma DNIT 139/2010 – ES.

Tabela 1 – Parâmetros para base e sub-base estabilizados granulometricamente

Parâmetro normatizado DNIT		Base	Sub-base
Índice de Suporte Califórnia (ICS)	$N \leq 5 \times 10^6$	$\geq 60\%$	$\geq 20\%$
	$N \geq 5 \times 10^6$	$\geq 80\%$	
Limite de liquidez (LL)		$\leq 25\%$	-
Índice de plasticidade (LP)		$\leq 6\%$	-
Equivalente de areia para $LL > 25\%$		$> 30\%$	-
Expansão		$\leq 0,5\%$	$\leq 1\%$
Ensaio Abrasão Los Angeles		$\leq 55\%$	-
Composição granulométrica dentro da faixa estabelecida pela norma		Sim	-
Fração retida na peneira nº10 constituída de partículas duras e isentas de substâncias prejudiciais		Sim	Sim

Fonte: Norma DNIT 141/2010 e Norma DNIT 139/2010

A Tabela 2 apresenta as condições específicas dos materiais para a base de solo melhorado com cimento, conforme a Norma DNIT 142/2010 - ES, e para a sub-base de solo melhorado com cimento, conforme a Norma DNIT 140/2010 – ES.

Tabela 2 – Parâmetros para base e sub-base de solo melhorado com cimento

Parâmetro normatizado DNIT		Base	Sub-base
Índice de Suporte Califórnia (ICS)	$N \leq 5 \times 10^6$	$\geq 80\%$	$\geq 30\%$
	$N \geq 5 \times 10^6$		
Limite de liquidez (LL)		$\leq 25\%$	-
Índice de plasticidade (IP)		$\leq 6\%$	-
Limite de liquidez (LL) fração passante na peneira nº 40		$\leq 40\%$	-
Índice de plasticidade (IP) fração passante na peneira nº 40		$\leq 18\%$	
Expansão		$\leq 0,5\%$	<1
Composição granulométrica dentro da faixa estabelecida pela norma		Sim	-
Fração retida na peneira nº10 constituída de partículas duras e isentas de substâncias prejudiciais		Sim	Sim

Fonte: Norma DNIT 140/2010 e Norma DNIT 142/2010

2.2.1 Comportamento mecânico dos materiais de base e sub-base

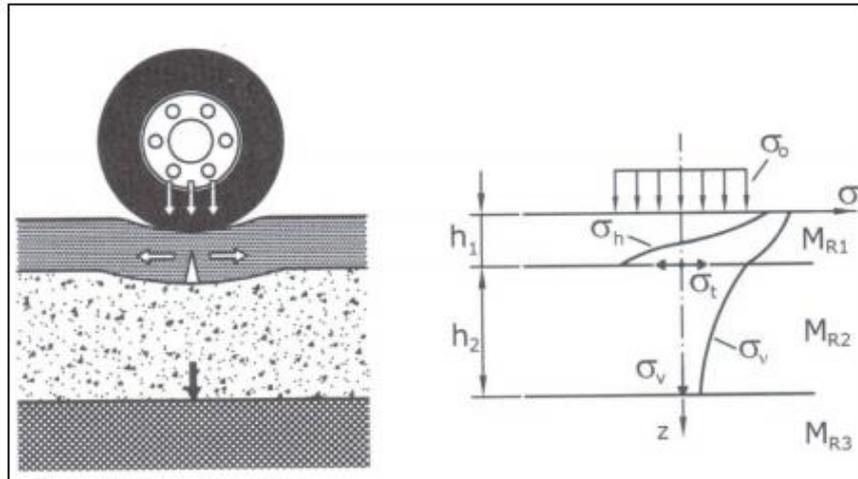
A base em um pavimento asfáltico flexível se encontra bastante próximo ao revestimento, devendo, assim, possuir elevada resistência à deformação para conseguir suportar as altas pressões que estão submetidas. Já a sub-base pode apresentar uma qualidade inferior e, geralmente, é composta de materiais de jazidas locais (YODER; WITCZAK, 1975).

Papagianakis e Masad (2007) explicam que devido a cargas e descargas oriundas do tráfego de veículos os materiais granulares das bases e sub-base apresentam um comportamento elasto-plástico. Quando se fala em uma componente de deformação elástica ela é recuperável, já tratando-se de plástica ela é permanente. Medina e Motta (2005) definem resiliência como a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando interrompem o carregamento causador das deformações, podendo esta propriedade ser avaliada e mensurada no ensaio triaxial de cargas repetidas.

Gonçalves (2002) complementa que no pavimento flexível a distribuição das tensões e deformações na estrutura pelas cargas da roda, se dá de forma que as camadas de revestimento e base suavizem as tensões verticais de compressão no subleito por meio da absorção das tensões cisalhantes. A Figura 3 ilustra a distribuição de tensões que ocorrem na estrutura de um pavimento, quando solicitado por uma carga vertical de compressão na superfície. Nota-se que na fibra inferior do

revestimento asfáltico surgem as tensões de tração e de compressão, devido ao carregamento e descarregamento repetido.

Figura 3 – Tensões em uma estrutura de pavimento



Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015)

Para Gonçalves (2002), o acúmulo de deformações plásticas sob cargas repetidas em materiais granulares que constituem camadas de base e sub-base é altamente dependente do estado de tensões efetivas e estas são desconhecidas, na medida em que ocorre a compactação de uma camada granular induz elevadas tensões horizontais residuais cujo a estimativa é ainda incerta. Ainda segundo o autor, de forma geral considera-se um comportamento elástico linear, deixando-se a consideração dos efeitos dinâmicos para serem embutidos nos módulos de elasticidade dos materiais das camadas.

Rodrigues (1998) justifica que o procedimento estático equivalente é plausível, visto que os efeitos inerciais têm pequena influência, para as velocidades usuais e irregularidades presentes nas vias.

O ensaio CBR (Califórnia Bearing Ratio) consiste na medida de deformações sobre a superfície de solos compactados (BALBO, 2007). O ensaio ocorre por meio de uso de pistão e penetração e foi concebido, portanto, para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos, expresso em porcentagem, este ensaio faz a comparação da resistência de penetração do material com a resistência de penetração de um material padrão (BERNUCCI et al.2008). Medina e Motta (2015) salienta que a penetração CBR submete a amostra a deformações plásticas elevadas

e é medida em um ponto. Bernucci et al (2008) ressaltam que o modo de ruptura e as condições de deformabilidade não correspondem ao estado de tensões atuante em um pavimento.

2.2.2 Utilização de resíduos em camadas de base e sub-base

A utilização de resíduos de construção e industrial reciclados nas camadas dos pavimentos tem apresentado boas respostas tecnológicas, já existem estudos e experiências, neste assunto, realizadas em cidades no Brasil e no exterior (CARNEIRO; BRUM; CASSA; 2000).

A Federal Highway Administration (2000) expõe os resultados de estudos realizados em países da Europa reconhecidamente ativos em pesquisa, política, e programas incentivadores do uso de materiais reciclados. No relatório é confirmado que os procedimentos não mudam quando se utilizam agregados reciclados na construção das rodovias, porém ressalta a necessidade do conhecimento das características mecânicas e performance ambiental desses materiais, sugerindo que eles se equiparem com as especificações dos materiais naturais.

Lopes et al.(2015) em seu artigo avaliam a aplicabilidade, em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, das cinzas obtidas na queima do carvão mineral em usinas termoelétricas. Foram realizadas misturas com diversos teores de cinza e realizado os ensaios de caracterização física, química e mecânica (compactação, módulo de resiliência e deformação permanente). Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo dependentes do teor e tipo de cinza utilizado. Os autores ressaltam o emprego positivo do uso de cinzas de carvão mineral em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

Aranha (2013) em sua dissertação, pesquisa a técnica de reciclagem de solo-agregado com adição de cimento para reconstrução de pavimento asfáltico deteriorado. Em sua dissertação a autora utilizou agregados reciclados provenientes da base de solo-brita da rodovia Fernão Dias. Neste material a pesquisadora adicionou cimento Portland para composição de novos materiais de base reciclada. Foram produzidos em laboratório misturas de material reciclado com cimento em diversos teores do aglomerante e energia de compactação, obtendo influências no comportamento mecânico em todas misturas cimentadas.

Sachet (2012) em sua tese estuda a incorporação de fresado asfáltico em concreto compactado com rolo (CCR) para bases de pavimento. Em seus estudos foram produzidos misturas de CCR com substituições de brita 1, pedrisco e agregado natural por fresado asfáltico. Foram realizados ensaios de compressão diametral e tração na flexão, chegando a resultados onde a incorporação do RAP, em qualquer fração, diminuiu drasticamente a resistência mecânica dos corpos de prova. As análises realizadas com microscópio óptico, lupa estereoscópica e com microscópio eletrônico de varredura provaram que a interface entre agregado fresado e a pasta de cimento foi prejudicada pela presença do filme asfáltico nos agregados de RAP. Mesmo tendo reduzido a resistência das misturas de CCR, a incorporação do RAP ainda pode ser utilizada como base e sub-base de pavimentos, pois conseguiu os parâmetros mecânicos que viabilizam seu uso.

Queiroz (2011) em sua dissertação apresenta uma alternativa técnica para utilização dos resíduos de fresagem em camadas de base ou sub-base de pavimentos rodoviários, por meio de misturas com solo de jazida, cal e cimento. O pesquisador avaliou as propriedades físicas dos materiais utilizados e a avaliação das propriedades mecânicas das misturas. Os melhores resultados foram obtidos nas misturas realizadas com a adição de cimento, onde os valores de CBR são compatíveis com as especificações do DNIT para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

Na dissertação de Pires (2014) foi realizado uma pesquisa com material fresado de pavimento asfáltico, com estabilização granulométrica e química, a última com o uso de cimento Portland e a cinza da casca de arroz. A estabilização granulométrica foi feita estabelecendo o teor de 70% de material fresado e 30% de agregado natural. Foram moldados corpos de prova com diferentes teores de cimento e submetidos ao ensaio de resistência a compressão. A partir dos resultados obtidos, novos corpos de prova foram moldados para ensaios de resistência a compressão, tração e módulo de resiliência, sendo substituído em massa o cimento Portland por cinza de casca de arroz moída. Na análise dos resultados observa-se o teor de 15% de CCA alcançou valores muito próximos das misturas de referência justificando a possibilidade de abranger os estudos destes materiais.

2.3 Fresado Asfáltico

O termo fresagem tem origem na técnica utilizada para corte ou desbaste de metais, através de uma engrenagem motora composta de um cortador giratório ou várias freses, em movimento giratório contínuo (BONFIM, 2011).

Quando direcionada a restauração de pavimentos, Bonfim (2011) conceitua fresagem como o corte ou desbaste de camadas do pavimento, com finalidade de restauração, através de processo mecânico, que pode ser a quente ou a frio. Comumente a fresagem atinge apenas a camada do revestimento, podendo também, quando necessário, atingir demais camadas.

A partir da segunda metade da década de 1970 surgiu concomitantemente, tanto na Europa quanto na América do Norte, o equipamento de fresagem, onde possibilitava o desbaste do pavimento em espessuras pré-determinadas. Na literatura internacional o material oriundo da fresagem de pavimentos asfálticos é conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) (ANDRADE; SOARES; BARROSO; 2013).

Com a crise do petróleo em 1974, passou a se enxergar como um grande desperdício descartar os materiais oriundos das restaurações de pavimentos e tornou-se mais oneroso a pavimentação das pistas deterioradas, com isso os técnicos da engenharia rodoviária precisaram dar maior atenção a reciclagem de pavimentos betuminosos. A fresagem teve início no Brasil nas obras de restauração da via Anchieta no início do ano de 1980 (BONFIM, 2011).

A Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Esta resolução pretende minimizar os impactos causados ao meio ambiente pelo inadequado descarte dos resíduos incluindo o fresado asfáltico. A resolução cita os materiais resultantes da preparação e escavação de pavimentos e os qualifica na Classe A, onde os resíduos enquadrados nesta situação são reutilizáveis ou recicláveis como agregados ou deverão ser encaminhados ao aterro de preservação para uso futuro.

A destinação adequada do material fresado causa grande preocupação, principalmente nas grandes cidades, onde este material é gerado em abundância a partir de aberturas de valas e restaurações de vias públicas (SACHET, 2012).

Balbo e Bodi (2004) complementam falando que os materiais fresados oriundos das misturas asfálticas nas grandes e médias cidades, onde na ocorrência de

restauração de um pavimento urbano é indesejável que se eleve o greide da plataforma viária, visto que isso ocasionaria problemas com soleiras guias e sarjetas, o reuso do material fresado é empregado na execução de revestimento primário em ruas periféricas.

Na Tabela 3 têm-se dados referentes ao material fresado procedente da recuperação de pavimentos com revestimentos desgastados no município de São Paulo.

Tabela 3 – Montantes e valores das misturas asfálticas retiradas de pavimentos em São Paulo

Serviço anual	Tipo de material extraído	Quantidade estimada para 2003 (t)	Quantidade de CAP antigo estimado (t)	Quantidade de agregados recicláveis estimado (t)	Custo estimado do CAP novo (R\$)	Custo dos agregados novos (R\$)
Abertura de valas	Misturas asfálticas em blocos	396.288	23.777	372.511	21.755.955,00	8.754.008,50
Restauração de vias públicas	Misturas asfálticas fresadas	151.200	9.072	142.128	8.300.880,00	3.553.200,00

Fonte: Balbo e Bodi (2004, p.176)

Baldo e Bodi (2004) justificam, com base nos valores apresentados na Tabela 3, a existência de legislação para o reaproveitamento do RAP em outros países e que é necessária uma investigação racional de como empregar este material aproveitando suas potencialidades, econômicas e técnicas.

Segundo a *Federal Highway Administration* (1997) com base em dados incompletos se estima que nos Estados Unidos são produzidos cerca de 45 milhões de toneladas de RAP e que sua maioria é reincorporado na pavimentação asfáltica ou utilizado como agregado em base e sub-base de pavimentos.

A grande maioria do material fresado é composta por agregados minerais e uma pequena porcentagem de cimento asfáltico endurecido. Devido a oxidação do asfalto, com o decorrer da idade ocorrerá o seu endurecimento e elevação da viscosidade. As propriedades mecânicas de um RAP dependem do material original, método aplicado para recuperar o material e o grau de processamento, como ele pode

ser obtido a partir de pavimentos de idades diferentes, a qualidade irá variar (FWHA, 1996).

2.3.1 Equipamentos de fresagem e seus componentes

Neste capítulo será tratado sobre os principais equipamentos e acessórios utilizados para a fresagem asfáltica a frio no Brasil. Bonfim (2011) coloca que nos últimos anos ocorreram elevados avanços tecnológicos tornando os equipamentos de fresagem menores e mais potentes, sendo importante o conhecimento das novas tecnologias para uma melhor produtividade em campo.

2.3.1.1 Máquina fresadora

O principal equipamento utilizado no processo de fresagem é a máquina fresadora, através de um movimento de rotação de um cilindro é efetuado o desbaste da camada superficial do pavimento (PINTO, 2010).

No mercado são comercializados vários modelos de diversos fabricantes de equipamentos de fresagem, sendo alguns de fabricação nacional, atendendo as necessidades do mercado. Normalmente, a nomenclatura adotada a estes equipamentos fazem referência à largura do cilindro fresador. Comumente classifica-se os equipamentos fresadores quanto ao seu tamanho, sendo de pequeno, médio e grande porte (BONFIM, 2011).

Devido à dificuldade de arremates em serviços de fresagem junto às interferências nos pavimentos, surgiram os equipamentos de fresagem de pequeno porte. Devido ao seu tamanho reduzido estes equipamentos se tornaram mais versáteis e possibilitam a realização de pequenos arremates e intervenções em pontos localizados. Nestes modelos podem apresentar correia transportadora para carregamento do material fresado para caminhões basculantes. A maioria dos equipamentos de fresagem de pequeno porte são apoiados sobre pneus maciços (BONFIM, 2011).

As fresadoras de pequeno porte são indicadas em reparos parciais da pista, fresagem ao redor de estruturas fixas de estradas, fresagem de abertura e junções, trabalhos de demarcação e fresagem de faixas sonoras (WIRTGEN, 2016).

Na Figura 4 apresentada uma fresadora de pequeno porte realizando a remoção de uma pequena superfície de asfalto que necessita de reparo.

Figura 4 – Fresadora de pequeno porte



Fonte: Adaptado de Wirtgen (2016)

Os equipamentos de fresagem de médio porte atendem áreas pequenas e grandes. Não são adequados para arremates, porém em ruas estreitas apresentam maior versatilidade em manobras. Neste tipo de equipamento está presente a correia transportadora do material fresado que encaminha o material para o caminhão basculante simultaneamente a fresagem (BONFIM, 2011).

Salienta-se que alguns equipamentos de médio porte não apresentam boa produtividade em áreas maiores. A Figura 5 apresenta uma fresadora de médio porte executando a remoção do asfalto.

Figura 5 – Fresadora de médio porte



Fonte: Adaptado de Wirtgen (2016)

Os equipamentos de fresagem de grande porte são aqueles que possuem os maiores cilindros fresadores e, por este motivo, são indicados para grandes áreas. Para o bom desenvolvimento dos trabalhos devem operar em locais amplos e sem interferências, como ruas largas, grandes avenidas e rodovias. A maioria das fresadoras desta categoria são apoiadas sobre esteiras com a finalidade de distribuir melhor as tensões na superfície de apoio, por se tratar de um equipamento de peso elevado. As esteiras são revestidas com material do tipo poliuretano para evitar danificação ou marcação da superfície (BONFIM, 2011).

Bonfim (2011) destaca que quando se opta por a utilização deste equipamento deve-se evitar a realização de manobras, visto que devido ao seu tamanho pode gerar problemas no trânsito e redução de produtividade. A Figura 6 apresenta uma fresadora de grande porte.

Figura 6 – Fresadora de grande porte



Fonte: Adaptado de Wirtgen (2016)

O cilindro fresador é um tambor em aço especial onde estão presentes os dentes de corte. Estes cilindros são acionados por meio de correias, correntes ou motores hidráulicos, trabalhando em alta rotação, e, quando colocados para cortar, efetuam o desbaste de espessura do pavimento (BONFIM, 2011).

Segundo Bonfim (2011), os cilindros possuem os dentes dispostos na forma de “V”, dessa forma quando ocorrer o giro do cilindro o material fresado será encaminhado para o centro da caixa do cilindro e lançado para a esteira

transportadora. Este equipamento apresenta variados sistemas de fixação, troca de suportes, número e espaçamento de dentes, possibilitando assim diversas rugosidades na pista. A Figura 7 exemplifica um cilindro fresador.

Figura 7 – Tambor com fresas da máquina fresadora



Fonte: FHWA (1997 p.3-5)

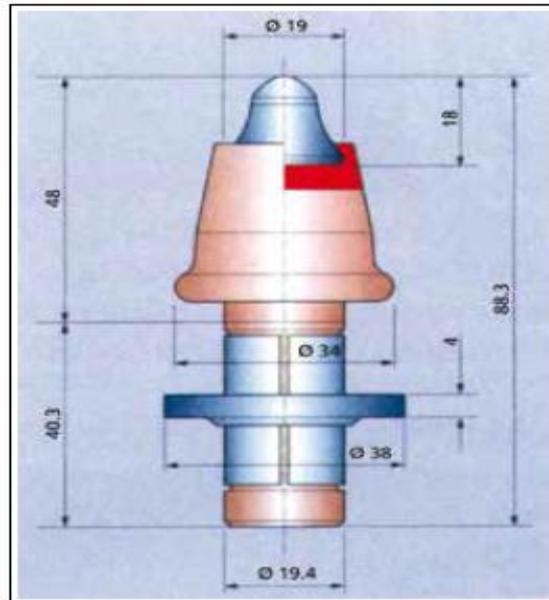
Os dentes de corte, conhecido no Brasil também como bits, são responsáveis pelo desgaste do pavimento, agindo diretamente no mesmo. Tratam-se de pontas de ataque com corpo forjado em aço e com ponta de material mais duro (BONFIM, 2011).

O dente de corte possui um anel cilíndrico no qual envolve a base para que auxiliem na sua fixação e que permita a livre rotação do dente durante o processo de fresagem. As máquinas fresadoras possuem um reservatório de água que durante o desgaste do pavimento exala água no cilindro fresador, evitando que o dente de corte deixe de girar no anel cilíndrico e assim evitando o desgaste desigual (BONFIM, 2011).

Para Bonfim (2011) o desgaste do dente de corte é bastante variável, a qualidade e dureza tanto dos agregados quanto ligante betuminoso são influência direta de deterioração, além da profundidade, espessura de corte e degradação do pavimento.

O modelo de dente de corte utilizado nas fresadoras a frio padrão está esquematizado na Figura 8.

Figura 8 – Desenho esquemático do dente de corte (medidas em milímetros)



Fonte: Bonfim (2011, p. 46)

2.3.2 Processo de produção do fresado asfáltico

A fresagem direcionada à restauração de pavimentos pode ser caracterizada quanto à temperatura de ocorrência, a quente ou a frio. Quando realizado a frio a técnica de fresagem é feita em temperatura ambiente, sem o pré-aquecimento do pavimento, neste caso ocorre a quebra dos agregados que compõe a mistura asfáltica na profundidade de corte gerando uma alteração na curva granulométrica do material existente na pista (BONFIM, 2011).

O Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná – DER/PR (2005) apresenta que para execução da fresagem a frio é empregado uma máquina fresadora autopropulsionada, que possa cortar as camadas do pavimento na profundidade de projeto, regulando a espessura a ser removido, seja por movimento rotativo de tambor dotado de dentes ou através de tambor para microfresagem, como pode ser visto na Figura 9. Além disso a fresadora deve fresar a frio na largura necessária e possuir dispositivo de elevação do material removido para a caçamba de caminhões.

Figura 9 – Cilindro de microfresagem



Fonte: Bonfim (2011, p. 38)

A ARRA (2001) reforça que a máquina fresadora possui um tambor de corte rotativo de grande diâmetro equipados com dentes que irão remover o pavimento existente, uma pequena quantidade de água pode ser utilizada durante a fresagem para controlar a quantidade de poeira gerada. O RAP produzido é transportado pela máquina fresadora até caminhões que encaminharão aos locais adequados para poderem ser reciclados.

Segundo Bonfim (2011), na fresagem a quente é realizado o pré-aquecimento do revestimento, quando for executada a escarificação da camada a ser desbastada ela oferecerá menor resistência ao corte por estar aquecida. Assim não ocorrerá uma alteração expressiva na granulometria do material.

Segundo a ARRA (2001), quando utilizada a fresagem a quente, 100% do pavimento é reciclado no local. O autor indica que neste tipo de tratamento as profundidades de corte variam entre 20 mm e 50 mm, em alguns casos chegando a 75 mm. Após o pavimento ser fresado ele é misturado a agentes de reciclagem, agregados virgens e ligante asfáltico para que seja reutilizado e compactado com equipamentos de pavimentação convencional.

2.3.3 Classificação dos tipos de fresagem

Bonfim (2011) classifica a fresagem, de maneira simplificada, por meio da espessura de corte e da rugosidade resultante na pista. O autor diferencia a espessura de corte em superficial, rasa e profunda.

A fresagem superficial é destinada apenas para regularização e correção dos defeitos na camada de rolamento, sendo desnecessário o recapeamento da pista, pois a textura final proporciona uma trafegabilidade segura, porém não muito confortável. Este tipo de fresagem é feito em locais específicos onde a desagregação do revestimento acarrete a formação de buracos (BONFIM, 2011).

A fresagem rasa é aplicada para o reparo de defeitos funcionais e remendos superficiais. Comumente utilizada em vias urbanas onde se deseja manter a cota do greide do pavimento. Este tipo de fresagem atinge as camadas superiores do pavimento podendo atingir a camada de ligação. A profundidade média de corte é de 5 cm (BONFIM, 2011).

Quando a fresagem é executada visando intervenção no âmbito estrutural, recompondo a estrutura do pavimento ou reciclagem e incorporação do revestimento a base é chamada de fresagem profunda. Neste procedimento o corte atinge níveis mais profundos podendo alcançar as camadas de base e sub-base do pavimento (BONFIM, 2011).

Se a classificação da fresagem for relacionada a rugosidade final da pista, Bonfim (2011) explica que está sendo feito automaticamente uma associação ao tipo de cilindro utilizado na máquina fresadora e velocidade de operação. Graças a evolução tecnológica hoje existem vários tipos de cilindros com diferentes espaçamentos dos dentes de corte. O autor classifica a rugosidade em três classes, que são: padrão, fina e microfresagem.

Quando o desbaste da camada é feito visando uma posterior aplicação de nova camada de revestimento Bonfim (2011) classifica como fresagem rasa. Nesta classificação a distância lateral entre os dentes do cilindro é de 15 mm e utiliza-se o cilindro padrão. Já o uso de cilindros com dentes de corte mais próximos, geralmente 8 mm, é chamado de fresagem fina. Neste tipo de fresagem os sulcos obtidos são menores e a rugosidade também é reduzida, possibilitando assim, em alguns casos, dispensa de um posterior recapeamento da pista.

A última classificação apresentada por Bonfim (2011) é a microfresagem onde os dentes de corte dos cilindros estão a uma distância aproximada de 2 a 3 mm. Neste método é removida uma camada muito fina do revestimento para a adequação do perfil longitudinal ou mudança no layout viário. O autor salienta que neste tipo de fresagem pode-se dispensar de maneira absoluta a aplicação posterior de uma nova camada de revestimento.

A Figura 10 apresenta uma comparação entre os tipos de fresagem de acordo com a classificação relacionada à rugosidade obtida na pista de rolamento, ou seja, fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem.

Figura 10 – Rugosidade após a fresagem na pista



Fonte: Adaptado de Bonfim (2011)

2.3.4 Granulometria do material fresado

O material resultante da fresagem do pavimento asfáltico pode ser aproveitado na reciclagem do pavimento, entretanto, o principal problema neste uso diz respeito à granulometria do material, principalmente quando a fresagem é realizada sem o preaquecimento do revestimento, onde surgirão grumos. Os grumos são pedaços de pavimento constituídos de agregados envolvidos por material fino e cimento asfáltico (BONFIM, 2011).

Bonfim (2011) apresenta um estudo das curvas granulométricas do material fresado a frio, sendo realizados ensaios com o material original antes da fresagem, o material fresado sem extração de betume e o material fresado com a extração de betume. O autor chega à conclusão que a fresagem provoca deslocamento das curvas comparados do material fresado em relação a curva do material original. O material que foi realizado a extração do betume, após fresagem e sem grumos apresentou uma curva deslocada para cima, o que caracteriza um material mais denso. Isso ocorre pois a fresagem provoca quebra dos agregados na altura da linha de corte.

Para as curvas do material sem a extração de betume, Bonfim (2011) chega a um resultado onde a curva se desloca para baixo, pois o material ainda está na forma de grumos o que reduz a porcentagem de material passante nas peneiras.

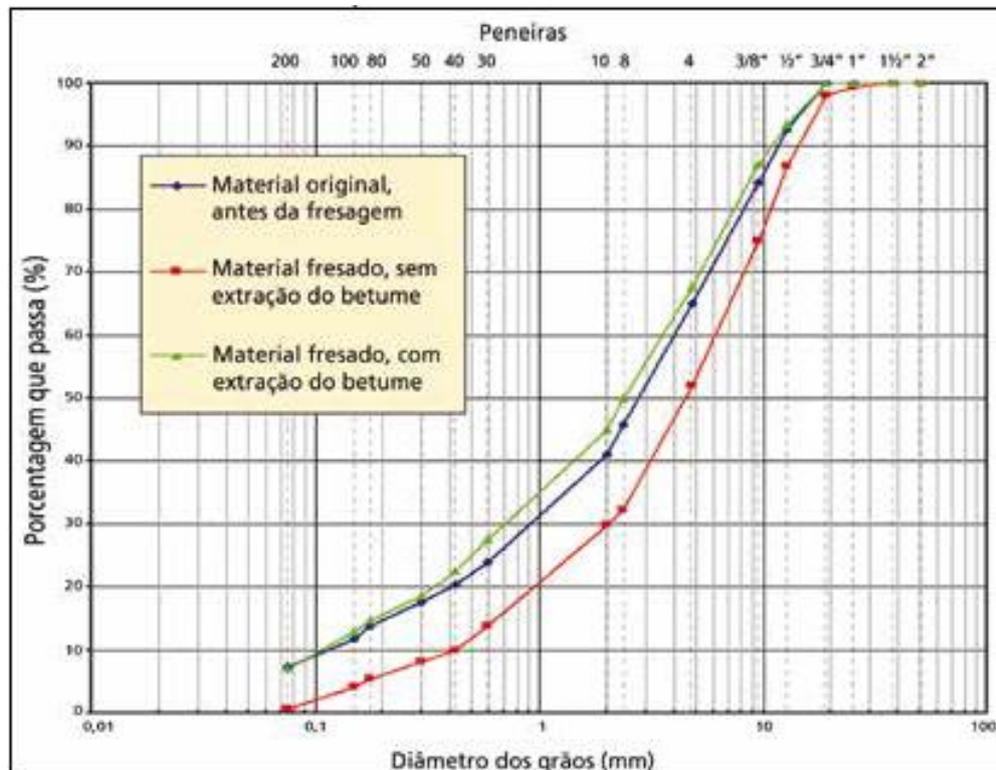
Bonfim (2011) realizou ensaios com diferentes velocidades de fresagem, neste o estudo verificou-se que o acréscimo da velocidade de avanço da fresadora aumenta o tamanho dos grumos produzidos devendo então controlar a velocidade de avanço para não se obter grumos de tamanhos indesejados. Quando a máquina apresenta uma velocidade de avanço baixa a mistura permanece em contato com os dentes por maior tempo resultando em uma granulometria menor.

Vale lembrar que nas máquinas fresadoras as velocidades são controladas manualmente através de alavancas.

Bonfim (2011, p.118) conclui que “quanto à quantidade de finos, ocorre, na realidade, uma redução dos mesmos, uma vez que a curva resultante das amostras com grumos se situa abaixo da curva original”.

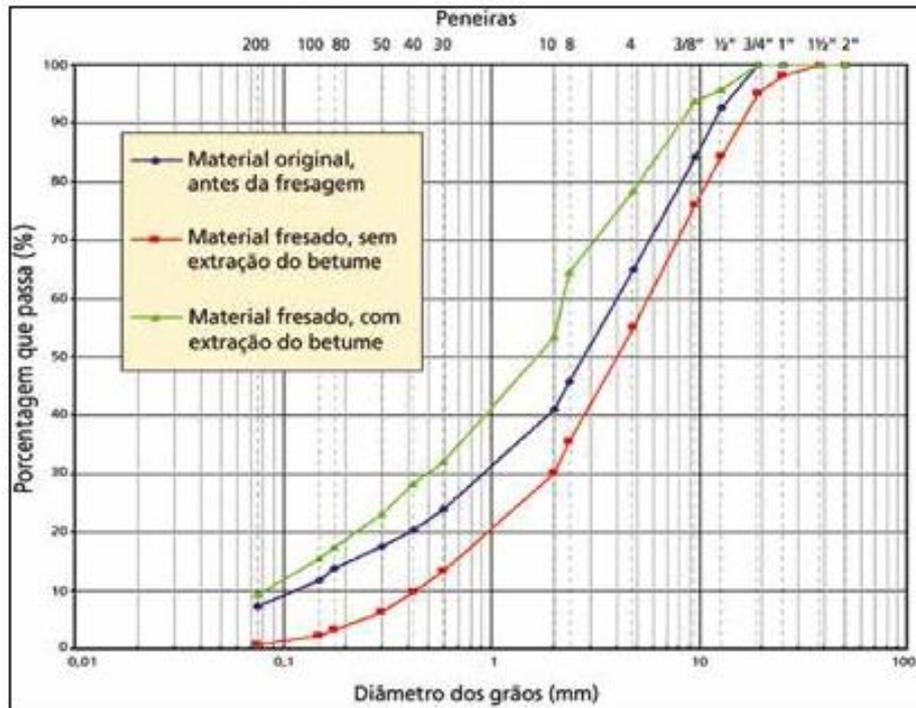
As Figuras 11 e 12 apresentam as curvas granulométricas plotadas por Bonfim (2011) nos ensaios com o material obtidos de diferentes velocidades de avanço da fresagem.

Figura 11 – Curvas granulométricas do material com velocidade 3m/minuto



Fonte: Adaptado de Bonfim (2011)

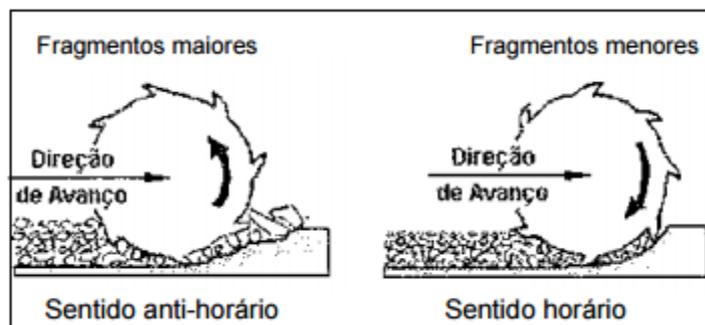
Figura 12 – Curvas granulométricas do material com velocidade 10m/minuto



Fonte: Adaptado de Bonfim (2011)

Araújo (2004) chama atenção para outro fator influenciador na granulometria do material fresado, no qual trata-se do sentido de rotação do cilindro do fresador no pavimento. Conforme a direção de avanço do equipamento, o cilindro poderá ter uma rotação horária ou anti-horária, conforme mostrado na Figura 13. No primeiro se obtém grumos menores, todavia, esta rotação não é a melhor situação para o corte do pavimento, principalmente quando ele apresenta grandes espessuras e material oxidado. No segundo os grumos resultantes são maiores e apresentam melhor desgaste nas camadas espessas devido o maior atrito do dente no pavimento.

Figura 13 – Sentido do giro do cilindro fresador



Fonte: Adaptado de Bonfim (2011)

Bonfim (2011) conclui que as curvas granulométricas do material fresado são bem graduadas, necessitando de estudos em relação ao comportamento mecânico do material fresado empregado na reciclagem de pavimentos. Araújo (2004) destaca que quando o fresado é utilizado para revestimento asfáltico, o ligante envelhecido é recuperado e a mistura tem sua granulometria corrigida com novos agregados. Quando se aproveita para base e sub-base a intenção é utiliza-lo com as características encontradas no momento da intervenção.

2.4 Reciclagem de pavimentos

Bernucci et al.(2008) apresentam a reciclagem de pavimentos asfálticos como alternativa a um pavimento com algum comprometimento estrutural. Pode ser feito pelo tratamento das camadas existentes ou adição de novas camadas, incrementando assim capacidade de carga a estrutura.

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) a reciclagem dos pavimentos existentes oferece vantagens em comparação com o uso convencional de materiais virgens, como a conservação de agregados e ligantes, menor consumo de energia, preservação do meio ambiente e restauração das condições geométricas.

A FWHA (1997) chama atenção que a reciclagem de pavimentos ajuda a resolver problemas com relação ao descarte do material existente e em alguns casos a perturbação no transito é menor do que as demais técnicas de reabilitação.

O reaproveitamento dos agregados na reciclagem dos pavimentos representa uma redução da demanda de novos materiais minimizando os custos de transporte e do uso de sítios de ocorrência de jazidas, além de evitar problemas com as restrições impostas pela legislação e proteção ao meio ambiente. Em um pavimento que necessita de reabilitação o asfalto é um material bastante valioso, que com o decorrer do tempo perde suas propriedades originais, porém na reciclagem podem ser restabelecidas facilmente quando combinado com um novo asfalto ou um agente rejuvenescedor (DNIT, 2006).

A ARRA (1997) definiu cinco grandes categorias para os diversos métodos de reciclagem do pavimento asfáltico: reciclagem a quente "*in situ*" ou em usina, reciclagem a frio "*in situ*" ou em usina e a reciclagem profunda (Full Depth Reclamation - FDR). O termo "a quente" não se refere a forma que o pavimento atingido será

removido e sim à temperatura em que ocorrerá a mistura e compactação dos componentes obtidos da reciclagem e os materiais virgens utilizados.

2.4.1 Reciclagem a quente

A reciclagem a quente é um processo que combina o RAP com agregados virgens, asfalto novo e agentes de reciclagem. Neste processo se utiliza a transferência de calor para suavizar o RAP e permitir a mistura do material (ARRA, 2001). O resultado final deve atender as especificações de misturas asfálticas a quente para as camadas de base, blinder ou rolamento (DNIT 2006).

2.4.1.1 Reciclagem a quente “*in situ*”

A reciclagem a quente local ou “*in situ*” é um processo de correção de defeitos na superfície, onde o revestimento asfáltico antigo é aquecido e fresado, misturado com agente rejuvenescedor, agregados virgens e mistura asfáltica, para que seja feita o espalhamento do material na superfície. Neste tipo de reciclagem não é necessário a remoção do material original do local de obra (DNIT, 2006).

Este processo basicamente consiste em quatro etapas, o amolecimento da camada do pavimento asfáltico com calor, escarificação do material de superfície, mistura do material com agente de reciclagem e a pavimentação da mistura reciclada do pavimento (ARRA, 1997).

O principal objetivo deste tipo de reciclagem é reabilitar as características funcionais do pavimento apenas na camada de desgaste, não podendo ser utilizada em ocasiões em que o mesmo possua patologias e deficiências ao nível de suas camadas estruturais (CUNHA, 2010).

Os principais defeitos no qual a reciclagem em questão é utilizada como resolução do problema são (PIRES, 2014):

- a) Afundamento da trilha de roda: causadas pela deficiência da camada de desgaste, são caracterizadas pelo aparecimento de deformações que ocorrem geralmente no sentido longitudinal da pista. Este defeito está relacionado com o ligante, onde possivelmente tem alto percentual em relação a mistura ou baixo teor de agregado graúdo na mesma.

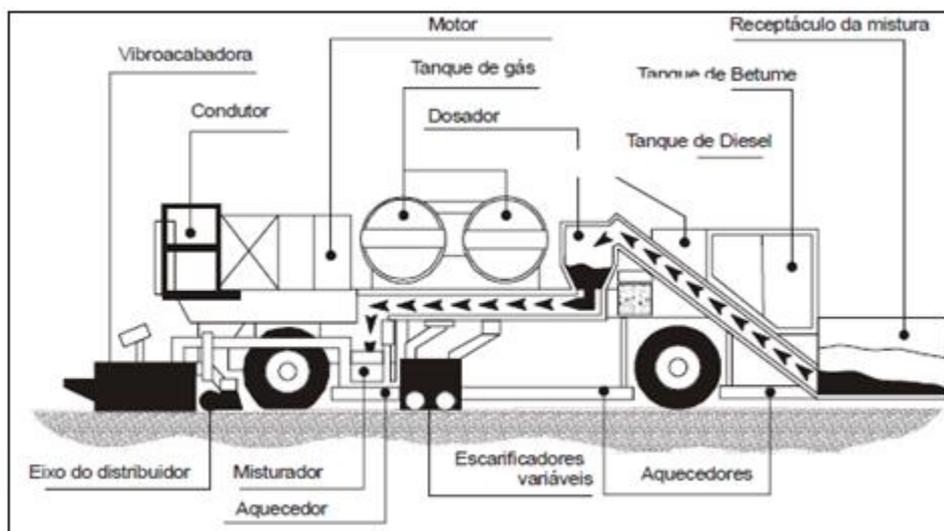
- b) Baixa resistência a derrapagem: Defeito ocorrido pelo elevado percentual asfáltico no revestimento e adversamente percentual insuficiente de agregado graúdo.
- c) Fissuras na camada de desgaste: Estão relacionados ao aparecimento de fissuras erros na dosagem do ligante asfáltico, erros de execução, espessura imprópria de revestimento ou ancoragem insuficiente entre as camadas de pavimento.

A reciclagem a quente “*in situ*” pode ser executada em operação de única passagem (single-pass) ou de passagens múltiplas (multiple-pass). Na primeira os materiais virgens são misturados com o RAP oriundo do pavimento asfáltico restaurado em uma única passagem, já na segunda a mistura reciclada é compacta e aplicação de uma nova camada de pavimento é adicionada (ARRA, 1997).

O DNIT (2006) identifica dois métodos de reciclagem já utilizados. O método Marini, onde a fresagem é realizada a frio e o equipamento processa a mistura do material a quente e em seguida o espalhamento. O método Wirtgen, chamado de sistema Remixer, constitui de uma recicladora de unidades fresadoras conjugadas com câmeras de aquecimento, onde as aquecedoras amolecerão o pavimento e a fresadora remove em uma única passada.

No sistema Remixer, o material fresado é processado em um misturador tipo “*pug-mill*” acoplado ao equipamento e é lançado posteriormente na pista através de um sistema distribuidor. A Figura 14 ilustra o sistema de reciclagem Remixer.

Figura 14 – Esquema do equipamento de reciclagem a quente no local



Fonte: Adaptado DNIT (2006)

Durante o processo do sistema Remixer um agente rejuvenescedor poderá ser adicionado ao revestimento antigo, ou adição de uma nova mistura ao misturador ou sua aplicação sobre a mistura reciclada como uma nova camada de desgaste (DNIT, 2006).

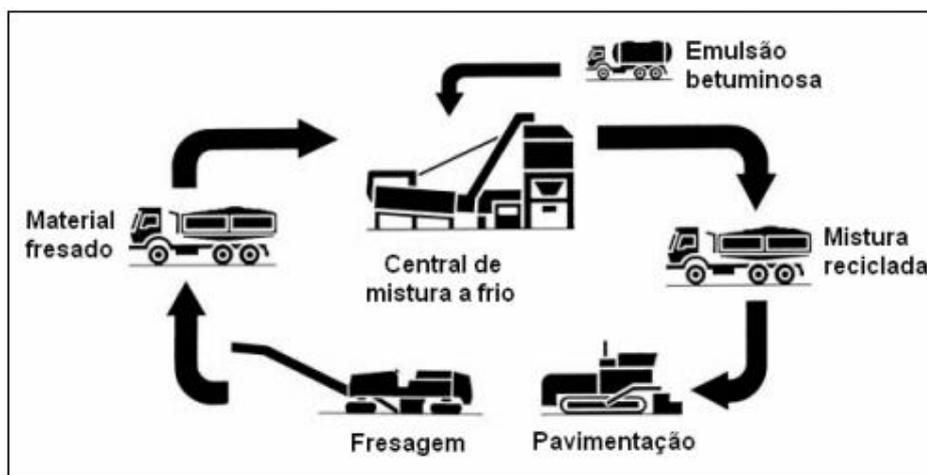
Embora bastante efetiva este tipo de reciclagem trata-se de uma técnica complexa devido as dimensões das máquinas utilizadas e não sendo aconselhada em termos ambientais, pois durante a produção do pavimento são emitidas substâncias para a atmosfera. É uma técnica indicada para estradas de grandes extensões e com elevada largura de faixa de rodagem (CABEÇAS, 2014).

2.4.1.2 Reciclagem a quente em usina

A reciclagem a quente em usina é uma técnica onde a estrutura do pavimento é removida, geralmente com fresagem a frio, e encaminhada para usina de asfalto, onde é feito a produção de uma mistura reciclada a quente. Podem ser utilizadas tanto usinas do tipo intermitente (gravimétrica), como usinas a tambor (drum-mixer). Após produção, a mistura é lançada e compactada, utilizando os equipamentos convencionais, processo semelhante a um concreto asfáltico convencional (DNIT, 2006). A aplicação técnica desta reciclagem, pode-se estender ao que foi apresentado pela Reciclagem a Quente “*In Situ*”.

A Figura 15 demonstra o processo básico da reciclagem à quente em usina.

Figura 15 – Esquema de processo de reciclagem a quente em central



Fonte: Adaptado de Wirtgen (2003)

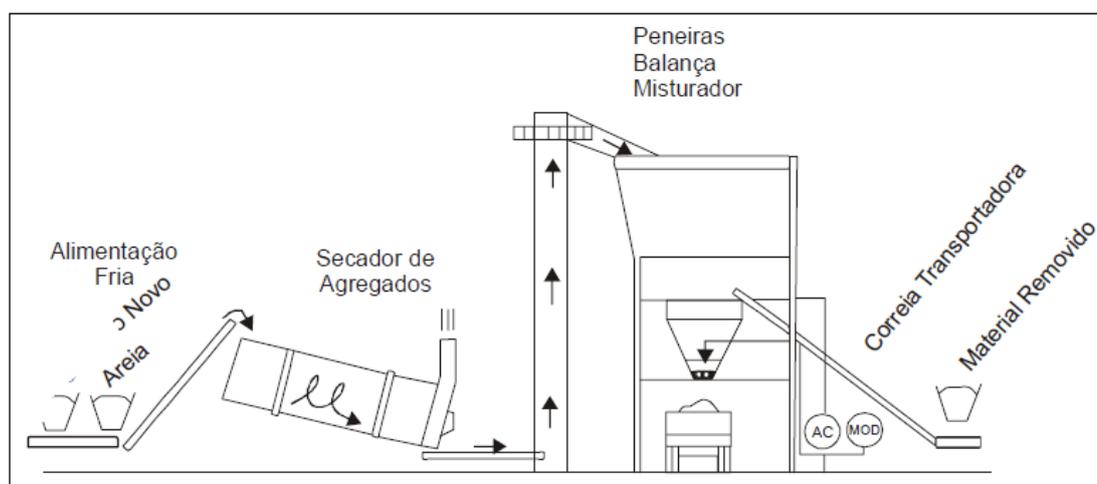
O pavimento velho e degradado é fresado no local onde se pretende executar o novo pavimento, sendo depois transportado para junto da central onde será fabricada a nova mistura betuminosa. O objetivo da incorporação do material proveniente do pavimento antigo é reduzir o uso de materiais novos e obtendo assim uma viabilidade econômica (CUNHA, 2010)

Para formulação da mistura betuminosa final com a adição do material fresado se faz necessário conhecer as características do agregado e do betume envelhecido, a porcentagem ótima de betume estará diretamente relacionado com a porcentagem de betume do material fresado (CABEÇAS, 2014).

Independentemente do tipo de central e do método de adição escolhido deve-se garantir que os agregados oriundos da fresagem não entrem em contato direto com a chama do queimador, pois poderá aumentar o envelhecimento do betume (CUNHA, 2010).

Quando se utiliza o método de usina intermitente (gravimétricas), na reciclagem a quente, ela poderá ocorrer com o material fresado sendo transportado para o receptáculo de pesagem na torre da mistura ou pelo sistema de silos quentes, onde o material removido é encaminhado neste silo (DNIT, 2006). A Figura 16 apresenta a operação de usina intermitente com o material introduzido no receptáculo de pesagem.

Figura 16 – Usina intermitente com material introduzido no receptáculo de pesagem

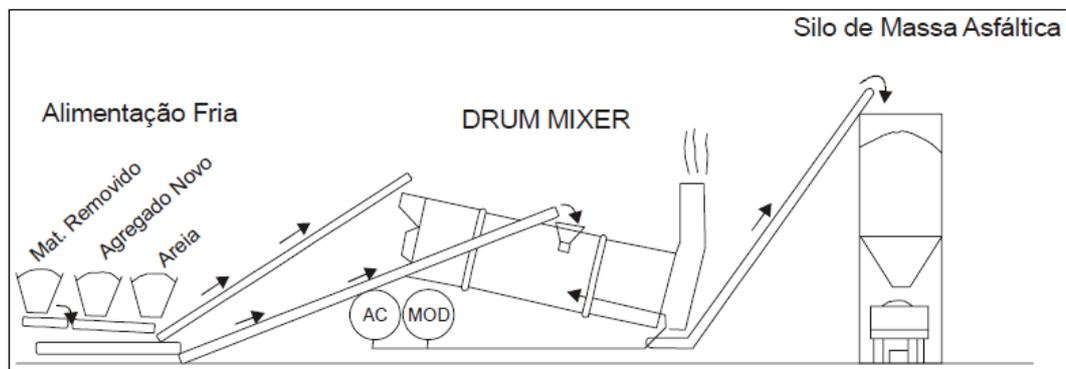


Fonte: DNIT (2006, p.187)

No processo apresentado o agregado virgem é seco e aquecido em um secador convencional, em seguida ele é peneirado na fração granulométrica e misturado em proporções adequadas com cimento asfáltico aquecido. O material removido está estocado nas dimensões apropriadas, ele é encaminhado através de uma correia transportadora até o receptáculo de pesagem na torre de mistura. O material removido é misturado juntamente com o agregado virgem superaquecido, onde ocorrerá a transferência de calor entre eles. Durante essa mistura serão adicionados o cimento asfáltico aquecido e o agente rejuvenescedor (DNIT, 2006).

Nas usinas do tipo “*drum mixer*” é utilizado o tambor secador convencional com pequenas alterações no intuito de evitar que o material removido seja exposto diretamente à chama do maçarico. O agregado novo entra no tambor pela extremidade do maçarico, onde será seco e aquecido, já o material removido entra num ponto mais abaixo, longe da chama. A Figura 17 ilustra a usina “*drum mixer*” na reciclagem a quente.

Figura 17 – Usina “*drum mixer*” na reciclagem a quente



Fonte: DNIT (2006, p.188)

A transferência de calor ocorre quando os dois materiais são combinados, a mistura é realizada na metade inferior do tambor e nesta etapa são adicionados cimento asfáltico adicional ou agente rejuvenescedor (DNIT, 2006).

2.4.2 Reciclagem a frio

A reciclagem a frio é um método onde a estrutura do pavimento ou parte dela é removida e reduzida a dimensão adequada para posteriormente ser misturada a frio. Podem ser acrescentados na mistura de materiais betuminosos, agregados, agentes

rejuvenescedores ou estabilizantes químicos, podendo ser feita em usina ou no próprio local. Após finalizada pode ser utilizada em camada de base, não sendo utilizado como camada de rolamento, passando a ter necessidade de ser revestida com um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica antes da liberação do tráfego de veículos. A espessura máxima alcançada com este tipo de reciclagem varia entre 75 a 100 mm (DNIT, 2006).

A mistura a frio utiliza emulsão asfáltica, é transportada e aplicada em temperatura ambiente, utilizando material granular proveniente da fresagem, água e aglomerante. Além do reaproveitamento de material, esta técnica possui o benefício ambiental de ser uma mistura a frio. Vale salientar que as técnicas de execução não diferem as técnicas convencionais de misturas a frio em usina ou *in situ* (ARANHA, 2013).

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT 2006) classifica a reciclagem a frio em função do agente estabilizante que é utilizado no pavimento pulverizado. Denomina-se reciclagem com adição de material betuminoso aquele em que é produzido uma base estabilizada com betume através da mistura do revestimento e da base pulverizados com adição de material betuminoso. Este tipo de reciclagem envolve apenas o revestimento e a base granular. Já a reciclagem com adição de estabilizante químico é a mistura da camada de revestimento, da base e subleito com estabilizantes químicos como a cal, cimento ou cinzas volantes.

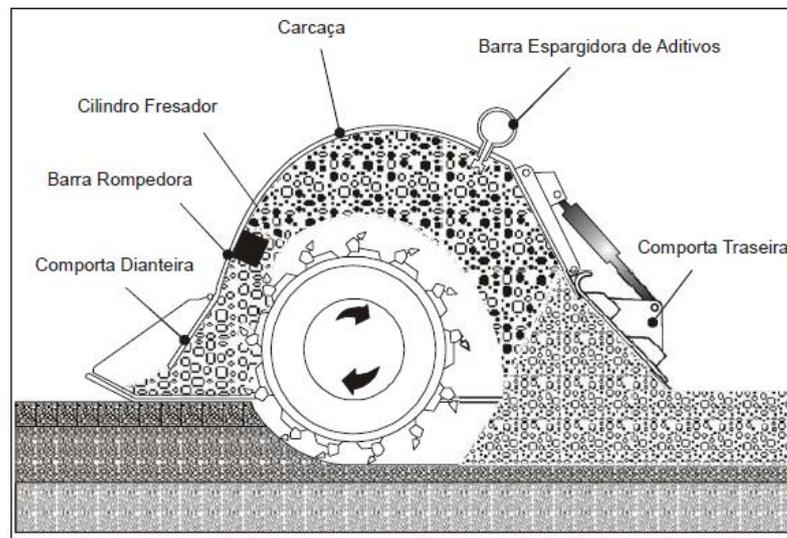
2.4.2.1 Reciclagem a frio “*in situ*”

Neste processo o material existente no pavimento será reutilizado no próprio local. O material fresado é misturado com o agente estabilizador (cal, cimento ou material asfáltico) e devolvidos em uma única passada (DNIT, 2006).

As recicladoras utilizadas neste processo apresentam um cilindro no qual a medida que a máquina avança, o material do pavimento *in situ* é pulverizado e suspenso até a câmara de mistura. As recicladoras são equipadas com um sistema que bombeia um fluido até a câmara e se mistura com material reaproveitado (WIRTGEN, 2016).

Quando é realizado a adoção de um estabilizante químico, o aditivo deverá ser espalhado na pista de rolamento antes da fresagem e mistura (DNIT, 2006). A Figura 18 ilustra um dispositivo de reciclagem a frio no local.

Figura 18 – Dispositivo de reciclagem a frio “*in situ*”



Fonte: DNIT (2006, p.200)

2.4.2.2 Reciclagem a frio em usina

A reciclagem a frio em usina, é aquela que ocorre quando o material após ser removido do pavimento é transportado para uma usina misturadora, esse processo costuma gerar transportes adicionais, custos de execução adicional e maior prazo para execução do serviço (DNIT, 2006). A Figura 19 apresenta a operação típica de uma usina com pilhas de estocagem do material de insumo.

Figura 19 – Usina de reciclagem a frio



Fonte: WIRTGEN (2006, p.77)

Por outro lado o uso da usina possibilita um melhor controle dos insumos, o produto final exigido pode ser obtido de combinação de diversas proporções de agregados em proporções precisas, que podem ser previamente selecionados, tratados e estocados. A proporção da mistura de materiais pode ser alterada conforme e quando necessária para obter a mistura necessária (WIRTGEN, 2016).

2.4.3 Reciclagem profunda

A reciclagem profunda (FDR) é um processo de reabilitação onde a camada de asfalto, juntamente com uma fração das camadas de base e ou sub-base é pulverizada e misturada, obtendo um material de base homogênea. Esta técnica é realizada sem adição de calor e as profundidades de tratamento costumam variar entre 100 a 300 mm (ARRA, 2001).

O resultado da camada de asfalto misturada com os materiais granulares subjacentes pode ser utilizado sem nenhuma modificação ou pode ser adicionado materiais granulares e também ser reforçado com um aditivo estabilizante. Geralmente o aditivo estabilizante serve para aumentar a resistência mecânica e a resistência estrutural, suportando assim a capacidade de carga prevista (ARRA, 2001).

Os aditivos mais comuns na reciclagem profunda são os cloretos de cálcio, cimento Portland, materiais pozolânicos e a cal. A adição de cimento resulta em menores camadas de revestimento betuminoso e uma camada de base menos sensível a água do que a base original, resultando em menor manutenção (ARANHA, 2013).

2.4 Estabilização de camadas de pavimentos

As obras de Engenharia Civil assentam-se sobre o terreno e por isso requerem que o comportamento do solo seja devidamente considerado (PINTO, 2006). Segundo Medina (1987) o solo é o material de construção civil mais comum e abundante na crosta terrestre e no prisma da terraplanagem e pavimentação ele está presente no subleito, sub-base, base e revestimento primário.

Quando o solo não apresenta as características desejadas, o engenheiro deve adotar medidas para contornar essa situação, seja evitar o terreno ruim, remoção do

solo ruim e substituição por um mais adequado, projetar a obra considerando as baixas qualidades do solo ou estabilização do solo existente (MEDINA, 1987).

Para Branco et al. (2008) a estabilização de um solo é o processo no qual se melhora as características do solo através de sua mistura com outros materiais. Quando se estabiliza um solo para fins de pavimentação deseja-se aumentar a capacidade de resistir e suportar as cargas e esforços do tráfego e também às ações erosivas de agentes naturais. A estabilização pode ocorrer por meio de processos naturais e artificiais, resultando em reduções no tempo de execução da obra e economia ao empreendimento (MARQUES, 2009).

Para Cordeiro (2007), tornar um solo estável envolve suplementar as propriedades mecânicas do mesmo para um determinado uso, escolha do método econômico e prático e a execução, que consiste na maioria dos casos pulverização, mistura de materiais e compactação.

As alterações das propriedades de um solo podem ser químicas, físicas e biológicas. Porém devido à grande variabilidade dos solos nenhum método pode ser considerado efetivo para todos os casos. As características de um solo podem se modificar no decorrer de sua profundidade e extensão. É importante ressaltar também que a estabilização não é necessariamente um processo infalível e que não se consegue alterar toda e qualquer propriedade do solo de forma positiva. Deve-se identificar quais as propriedades do solo se pretende melhorar (CRISTELO, 2001).

Desde longa data é empregado, nas camadas de base e sub-base de pavimentos, material granular, misturado ou não com solo. Sua importância na pavimentação é notória, visto que a maioria das obras deste tipo no país utilizam camadas granulares. Além disso, o material britado, serviu como padrão na concepção do ensaio CBR (BALBO, 2007).

Os principais tipos de estabilização são a estabilização mecânica, a estabilização granulométrica e a estabilização química (CORDEIRO 2007).

2.4.1 Estabilização de mecânica

A estabilização mecânica é método mais antigo utilizado nas construções de estradas. Ocorre por meio de uma energia externa de compactação que quando aplicado no solo reduz o número de vazios, com isso se altera as conduções de

compressibilidade e permeabilidade do solo, aumentando a resistência aos esforços externos (MEDINA; MOTTA, 2015).

Para Balbo (2007) as camadas com materiais que não empregam estabilização com ligante hidráulico ou asfáltico são camadas que recebem apenas estabilização puramente mecânica por efeito de compressão e adensamento dos materiais constituintes.

O fator determinante de sucesso na utilização de pedras britadas em camadas de pavimento é a correta compactação do material, pois irá permitir uma elevada resistência aos esforços verticais provocados nos pavimentos pela ação das cargas. Essa resistência é ao cisalhamento e é proporcionada pelo entrosamento entre às partículas do agregado, que melhora à medida que o esforço aumenta (BALBO, 2007).

Balbo (2007) enfatiza que a compactação que se dá em campo é bem diferente da que ocorre em laboratório. No primeiro ela se dá por vibração, amassamento e compressão, já no segundo ocorre apenas por impacto. A diferença mais significativa está no fato de que no laboratório ocorre o confinamento lateral em virtude do cilindro. O autor chega à conclusão que o teor de umidade ótimo obtido em campo, muitas vezes, pode ser diferente da obtida em laboratório, contudo, o ensaio em laboratório segue importante para a avaliação do potencial do material que se deseja empregar.

2.4.2 Estabilização granulométrica

Vargas (1977) observa que em algumas ocasiões não se consegue uma simples correção do material a ser utilizado, independente que nos solos se predominem pedregulhos, areias ou siltes e argilas. Neste tipo de situação se faz necessário a composição artificial de um solo estabilizado, obtendo a granulometria desejada através do uso das proporções adequadas de cada um deles e sua mistura.

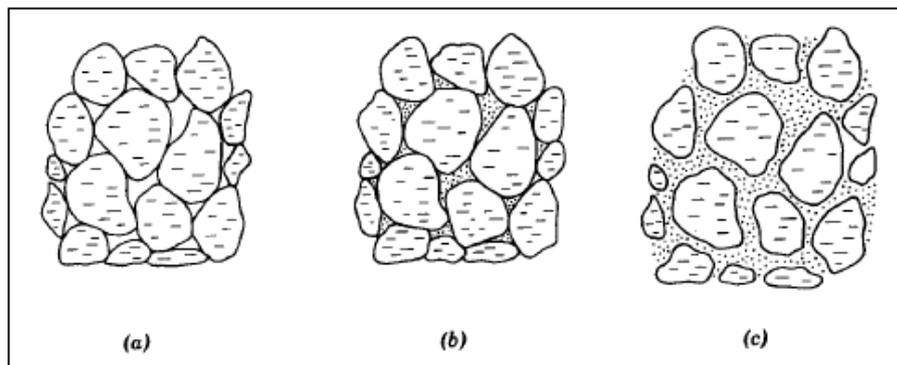
A estabilização granulométrica pode ser genericamente definida como um emprego de um material ou uma mistura entre matérias de forma que ele se enquadre dentro da especificação desejada. Neste método as propriedades do solo são alteradas por meio de retirada e de adição de partículas de solo (MARQUES, 2009).

Marques (2009) destaca que os projetos de misturas de agregados são muito utilizados em misturas de bases e sub-bases estabilizadas granulometricamente. O autor comenta que na prática uma mistura com propriedade ideal de resistência e

trabalhabilidade é realizado pela combinação entre solos de características granulares e solos de características coesivas.

A estabilidade das misturas granulométricas é dependente da forma, tamanho e granulometria das partículas, densidade relativa, fricção interna, coesão. Quando se deseja um material granular com máxima estabilidade deve ser combinado de forma que possua elevada fricção interna de modo a resistir as deformações sob carga. Pode-se subdividir os solos-agregados em três tipos, como mostra a Figura 20, de acordo com a proporção relativa de parte fina e graúda (YODER; WITCZAK, 1975).

Figura 20 – Estados físicos das misturas de solo-agregado



Fonte: Yoder e Witczak (1975, p. 357)

Yoder e Witczak (1975) explicam cada estado físico apresentado na Figura 20 da seguinte maneira:

(a) Nesta mistura existe uma quantidade pequena ou nada de fino e por consequência apresenta densidade baixa. A estabilidade ocorre pelo contato dos grãos sendo difícil manuseá-lo devido a inexistência de coesão. Trata-se de um material com permeabilidade e não suscetível a baixas temperaturas.

(b) Nesta situação a quantidade de finos preenche os vazios entre os agregados, resultando em um material com maior densidade. Este material possui baixa permeabilidade, e a resistência grão-grão é maior, apresenta menor deformabilidade e maior dificuldade de compactação. Do ponto de vista de estabilidade este material é ideal.

(c) Esta mistura apresenta uma quantidade elevada de finas que faz com que o contato entre os grãos maiores não ocorra. Este material apresenta permeabilidade inferior ao da situação b, dependendo do tipo de fino pode até não possuir

permeabilidade. Este material é sensível a variação de umidade e apresenta facilidade de compactação.

Pires (2014) conclui que a estabilidade de uma mistura é dependente da distribuição granulométrica e que a presença de material fino em pequena quantidade ou em elevada quantidade é prejudicial a performance da mistura.

Bernucci et al.(2008) colocam que para bases de pavimentos se prioriza o uso de materiais do tipo (a) e (b) pois ocorre o contato grão-grão. Procura-se que a mistura possua a distribuição granulométrica bem graduada, com preenchimento dos vazios. O autor salienta que já é empregado com frequência misturas do tipo (b) e (c), onde a natureza do material fino é de grande importância.

A brita graduada simples é um dos materiais granulares mais utilizados no Brasil como base e sub-base de pavimentos asfálticos, sendo introduzido na década de 60 em virtude do expressivo crescimento da malha rodoviária (BERNUCCI et al. 2008).

Balbo (2007) complementa que as britas graduadas simples são materiais resultantes de misturas (em usinas apropriadas) de agregados britados que passaram por peneiramento e classificação de acordo com sua faixa granulométrica. O autor ressalta que em obras de pavimentação as frações usadas para este material comumente vêm da mesma britagem e mesma rocha, resultando em uma mistura bem graduada.

Bernucci et al.(2008) expõem que a brita graduada simples é dosada e homogeneizada em usinas utilizando água e os agregados devem atender a uma das faixas especificadas em norma. São materiais com boa permeabilidade e seu transporte até a distribuição em pista é feita por caminhões basculantes. Os autores ressaltam a importância da compactação ser realizada após a distribuição na pista, para que não ocorra perda de umidade.

Balbo (2007) comenta que a dosagem da brita graduada simples é a seleção de faixa granulométrica a ser composta resultando em uma mistura bem graduada, sendo necessário apenas o ensaio de compactação para determinação do teor de umidade ótimo. O autor justifica que se é feita a correta dosagem e compactação da BGS a mistura alcançará sem dúvidas a capacidade de suporte do material padrão.

Além da qualidade dos agregados, o bom desempenho do pavimento também está relacionado com a sua distribuição granulométrica, pois influencia diretamente na deformação permanente da estrutura. O índice de vazios é um bom indicador para

verificar se a proporção do agregado irá resultar em baixas deformações, um menor índice de vazios apresentam melhores desempenhos das camadas de base e sub-base de pavimento com BGS, pois um melhor empacotamento dos agregados reduzem as deformações (LIMA e Motta, 2015).

2.4.4 Estabilização química

Na contraposição da estabilização mecânica, a estabilização química é uma modificação no solo por meio da adição de um ou mais produtos químicos que ao solidificarem ou reagirem irão aglomerar e preencher os poros (MEDINA, 1987).

Para Marques (2009), quando a estabilização química é realizada em solos granulométricos se deseja principalmente aumentar a resistência ao cisalhamento, pois os ligantes passarão estar em pequenas quantidades entre os grãos.

A estabilização química refere-se a alterações em sua estrutura através de incremento de aditivos em quantidade suficiente para melhorar as propriedades físicas e mecânicas (FRANÇA, 2003).

Quando um determinado produto químico é adicionado ao solo é possível se obter efeitos químicos e físicos (MEDIANA 1987). Na literatura são encontrados diversos tipos de aditivos químicos podendo ser produtos industrializados, até subprodutos ou resíduos industriais (FRANÇA, 2003).

O complexo solo-estabilizador pode assumir a forma de uma matriz continua com o solo ou não. Na matriz continua o estabilizador irá preencher todos os poros, ocorrendo a ruptura através da matriz e se estendendo entre os grãos. Na matriz descontinua o estabilizador não preenche os poros e passará a agir modificando as características das superfícies das partículas, vedando de forma inerte os poros e interconectando as partículas do solo (MEDINA, 1987).

Segundo Pires (2014) no Brasil a reciclagem de pavimentos com uso de estabilizantes químicos nas camadas de bases e sub-base vem crescendo, mas ainda existe uma ausência do comportamento dessas misturas tendo vista que o solo brasileiro e suas condições climáticas apresentam características intrínsecas que devem ser consideradas.

2.4.4.1 Estabilização química com cimento

A utilização de solo cimento em bases de pavimentos surgiu a partir do fato de que em diversas obras rodoviárias não estavam disponíveis em preços razoáveis os materiais britados devido ao grande custo do transporte. Por isso o uso das misturas de solo com cimento era considerado como uma alternativa de baixo custo, sendo motivo para admissão dessa tecnologia no Brasil a partir de 1950 (BALBO, 2007).

Para Branco et al. (2008) existem duas formas de utilização deste tipo de estabilização. A primeira se emprega pequenas quantidades de cimento (3% ou 4% de teor em cimento), com objetivo de reduzir a susceptibilidade de água no solo e aumentar de forma não tão significativa a resistência do solo, sendo o resultado de tal procedimento chamado de “solo tratado com cimento”. Outra maneira de emprego deste tipo de estabilização do solo é utilizando o cimento em dosagens maiores conduzindo a um material com elevada resistência, obedecendo a características próprias, conhecido como solo cimento. O primeiro material é indicado para estradas com pouco tráfego, já o segundo material pode ser utilizado em camadas de base e sub-base de pavimentos com elevado tráfego.

Yoder e Witczak (1975) definem que a produção do solo-cimento consiste na adição do cimento Portland ao solo pulverizado e que através da hidratação do cimento a mistura endureça.

O efeito do cimento nas misturas de solo-cimento, e do solo misturado com cimento, é criar uma camada, menor que os cristais hidratados do cimento, que envolva os grãos do solo, criando, assim, uma barreira contra a água e evitando a expansão dos solos sensíveis a umidade (BALBO, 2007).

Balbo (2007) esclarece que no solo-cimento existe elevado consumo de cimento, ocorrendo então mecanismos de retração durante a hidratação do cimento, tendendo a gerar fissuras durante a cura do material.

Yoder e Witczak (1975) afirmam que além do tipo de solo existem outros fatores influenciadores nas propriedades físicas do solo-cimento como o teor de cimento na mistura, o tempo de cura e a densidade seca da mistura compactada.

Bernucci et al.(2008) chamam a atenção que a base de solo-cimento tem resultados satisfatórios em resistência e durabilidade desde que a dosagem da mistura seja feita corretamente, e que os cuidados com o prazo máximo de mistura, espalhamento e compactação sejam respeitados. Os autores frisam que subleito

tenha boa capacidade de suporte para que o solo-cimento seja compactado de maneira correta. Yoder e Witczak (1975) citam que é importante a cura do material em presença de água para posterior abertura ao tráfego.

Em bases granulares tem sido bastante utilizado a brita graduada tratada com cimento (BGTC). Este material é a composição da BGS com reduzido teor de cimento Portland, em geral 3% a 4% do peso da mistura total (BALBO, 2007).

No Brasil seu uso foi disseminado na década de 70. A BGTC pode ser empregada como base de pavimento com revestimento betuminoso, entretanto, pode ser encontrada em pavimento intertravado ou de concreto (BERNUCCI et al.2008).

Balbo (2007) lembra que a BGTC apresenta uma rigidez, porém uma elevada presença de vazios não preenchidos por cimento, acarretando em baixa resistência e tenacidade sofrível, portanto apresenta um comportamento a fadiga baixo. Além disso, Bernucci et al.(2008) lembram que devido a cura do cimento, ocorre a retração, resultando em fissuras e trincas.

A BTGC é produzida em usina tipo *pugmill*, onde o cimento e a água são introduzidos na própria misturadora, utilizada na produção da BGS. Em alguns casos pode ser usado um aditivo retardador de pega na mistura. A compactação é realizada em uma camada apenas, diferentemente da BGS. Rolos lisos vibratórios são indicados para compactação (BALBO, 2007).

2.4.4.2 Estabilização química com cal

Há mais de dois mil anos, os romanos desenvolveram ainda mais a tecnologia de construção e estradas dos habitantes da Babilônia e Mesopotâmia. Além do avançado sistema de pavimentação em blocos, os romanos passaram a utilizar a cal como forma de tratamento do pavimento, para melhorar a sua resistência e possibilitar o tráfego de carroças de transporte de cargas pesadas (WIRTGEN, 2012).

Quando se estabiliza um solo com cal, ocorrem várias modificações em suas propriedades mecânicas, como por exemplo: em um solo argiloso, devido a aglomeração ou floculação das partículas, ocorre o aumento da granulometria; redução da compressibilidade e da plasticidade; retração da contração e expansão linear e, devido às reações de floculação, o aumento do coeficiente de permeabilidade (CORDEIRO, 2007).

Araújo (2004) apresenta que durante a mistura de solo e cal acontece a carbonatação, entre o dióxido de carbono presente na atmosfera e a cal. O resultado desse processo é um produto cimentante frágil, que não colabora com ganho de resistência final. A reação pozolânica ou cimentação ocorre entre a cal, água e as fontes de sílica, alumina e ferro, tais reações químicas produzem os silicatos e aluminatos de cálcio que proporcionam na mistura um aumento de resistência.

Branco et al. (2008) explica que para determinação do teor de cal a ser utilizado em uma mistura é necessário realizar uma análise de diferentes misturas com dosagens diferentes de cal, e a partir dos resultados e alterações na granulometria, limites de consistência e na resistência, definir o teor mais adequado.

RIZZO e LOLLLO (2006) apresentou um estudo no qual se estabilizou um solo arnoso siltoso com cal (72% de areia, 10% de silte e 8% de argila), e concluiu que com o aumento do teor de cal aumenta a umidade ótima e reduz o valor da massa específica aparente seca.

A utilização da cal para melhoria da resistência ao cisalhamento pode não ser efetiva em alguns solos, como os siltes e areias, mesmo após longo período de cura. Assim, emprega-se outro aditivo que possibilite reações químicas ou físicoquímicas de aglomerantes na mistura, obtendo melhores valores de resistência (ARAÚJO, 2009).

2.4.4.3 Estabilização utilizando a sílica da casca de arroz

Nos países produtores de grãos de arroz enfrentam um sério problema na destinação final da casca do arroz. O interesse mundial na utilização dos resíduos provocou interesse no estudo do emprego de cinza da casca de arroz em diversas áreas da engenharia (PIMENTEL, BANATI, 2010).

A cinza da casca de arroz vem sendo empregada como produto residual na estabilização de solos empregados em base e sub-base de pavimentos. A cinza da casca do arroz possui em sua composição entre 90% e 96% de sílica. A sílica quando empregada juntamente com a cal, reage quimicamente, formando produtos cimentantes (BEHAK; NUÑEZ, 2008).

Basha e Hashim (2003) realizaram um estudo com solo estabilizado com cinza de casca de arroz e cimento. As estabilizações com cimento foram positivas, obtendo um ganho de resistência efetivo. Já a estabilização com 4% de cimento e 15-20% de

cinza da casaca de arroz levaram uma resistência de até 8 vezes maior em relação a um solo estabilizado com 8% de cimento. Nota-se que uma quantidade menor de cimento combinada com a cinza se obtém uma resistência equivalente.

Em um estudo realizado por Klamt et al. (2013) com solo extraído do município de Alegrete – RS e estabilizado com adições de cal e cinza da casaca de arroz, os autores concluíram que o acréscimo de resistência com as aplicações dos teores de cal não aumentaram consideravelmente a resistência a compressão simples do material, porém os traços com adições de cal e cinza de casaca de arroz tiveram resultados mais relevantes, comprovando a efetividade do emprego da cinza da casaca de arroz juntamente com a cal em solos arenosos aplicados a base de pavimentos.

2.4.4.4 Estabilização utilizando cinza volante

A cinza volante é um rejeito oriundo da queima do carvão mineral em plantas de geração de energia termelétrica. No Brasil existem estudos com a utilização das cinzas em estruturas semi-rígidas e flexíveis de pavimentos, onde diversos autores comprovam a sua viabilidade, no que se refere ao desempenho mecânico, no uso em obras de pavimentação (FARIAS, 2005).

A cinza volante é um material pozolânico silico-aluminoso, que por si só, não possui nenhuma atividade aglomerante, porém quando dividido ou na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio para formar compostos aglomerantes (TABORDA, 2012).

Nardi (1975) apresenta um estudo no qual estabiliza um solo arenoso com cinza volante e cal hidratada. As experiências em laboratório do autor comprovam a possibilidade de utilização de mistura pozolânica em pavimentações de pistas de aeroportos bem como o seu uso em misturas em pavimentações em regiões de areia do litoral.

3 MATERIAIS E METODOS

3.1 Introdução

Neste capítulo serão reportadas as principais características dos materiais empregados durante a pesquisa e os métodos e procedimentos utilizados nos experimentos, para avaliar o emprego do material fresado em sub-base e base de pavimento rodoviário. Serão descritas as propriedades dos agregados e do aglomerante empregado. Além disso, são apresentados os procedimentos adotados para estabilização granulométrica e química do material fresado.

3.2 Planejamento da pesquisa

Inicialmente, na primeira etapa do estudo, foi realizada a adição de agregados virgens e pó de pedra ao material fresado, obtendo assim a mistura a ser trabalhada. O objetivo de tais adições é preencher os vazios do material fresado, visando beneficiar a resistência mecânica do material e atender as especificações de camadas de base e sub-bases estabilizadas granulometricamente. Além disso, foi realizado o ensaio de compactação da mistura, obtendo o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca.

Na segunda fase foi realizado a estabilização química do material obtido na primeira etapa. Para essa estabilização, o material escolhido neste estudo foi o cimento Portland pozolânico, adquirido no comércio local. Segundo o DNIT (2009), os teores usuais de cimento, na estabilização de base de solo melhorado com cimento, situam-se na faixa de 2 a 4% em peso em relação ao total da mistura. Logo, nesta pesquisa, optou-se por misturas com teores de: 2%, 3,5% e 5,0% de cimento.

Foram moldados corpos de provas de misturas com diferentes teores de cimento, material fresado e agregado virgem. Para o ensaio resistência à compressão simples os corpos de prova cilíndricos possuem dimensões 10x20cm, os ensaios de resistência a tração e módulo de resiliência utilizaram os mesmos corpos de prova com dimensão de 10cm de diâmetro e altura de 6,5 cm. Os corpos de prova foram colocados em câmara úmida e respeitados o período de cura de 7 e 28 dias. A Figura 21 apresenta os corpos de prova desmoldados durante a cura.

Figura 21 – Estados físicos das misturas de cimento



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 4 apresenta o número de corpos de prova para as porcentagens de cimento Portland adotados nesta pesquisa e os dias de cura para cada um deles.

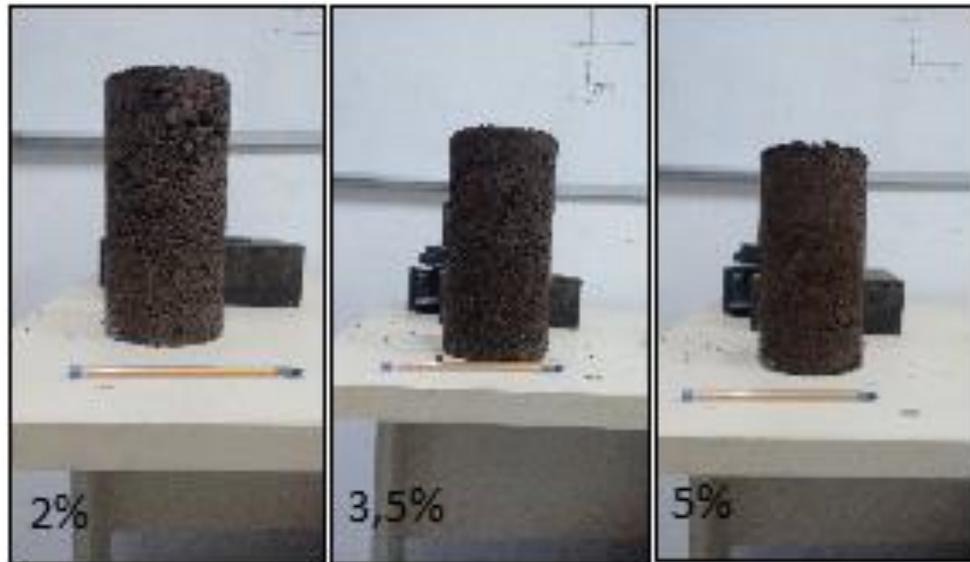
Tabela 4 – Número de corpos de prova para determinação do teor de cimento

CP's para determinação do teor de cimento			
Teor de cimento	Dias de cura	RCS	MR/RT
2,0%	7	3	-
	28	3	-
3,5%	7	3	4
	28	3	4
5,0%	7	3	4
	28	3	4

Fonte: Elaboração própria

Na terceira etapa foram realizados os ensaios de RCS, RTCD e MR. A Figura 22 apresenta um relatório fotográfico dos corpos de prova após a cura úmida, preparados para o ensaio de RCS com diferentes teores de cimento Portland. A Figura 23 exhibe a característica dos corpos de prova moldados para RTCD e MR.

Figura 22 – Corpos de prova para RCS com diferentes teores de cimento



Fonte: Elaboração própria

Figura 23 – Corpos de prova para RTCD/MR com diferentes teores de cimento



Fonte: Elaboração própria

3.3 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa são o material fresado, agregados virgens e cimento Portland. Todos esses materiais são comuns em obras de pavimentação e estão disponíveis na região da pesquisa.

3.3.1 Material fresado

O material fresado utilizado na pesquisa foi coletado a partir das atividades de fresagem da restauração da pista existente na BR 290/RS, seguindo as delimitações

de área e profundidade prescritas em projeto, com cortes variando entre 3,0 (três) a 6,0 (seis) centímetros de espessura. Foi utilizado a fresadora Wirtgen w1000.

Após a coleta do material ele foi armazenado em ambiente seco ao ar, em seguida quarteado e preparado para os ensaios de caracterização desejados: granulometria (DNER-ME 083/98), percentagem de betume em misturas betuminosas (DNER-ME 053/94). A Figura 24 apresenta a amostra do material fresado.

Figura 24 – Material fresado seco



Fonte: Elaboração própria

Foram executados antes da composição da mistura, o ensaio de compactação conforme a norma (DNER ME 162/94),

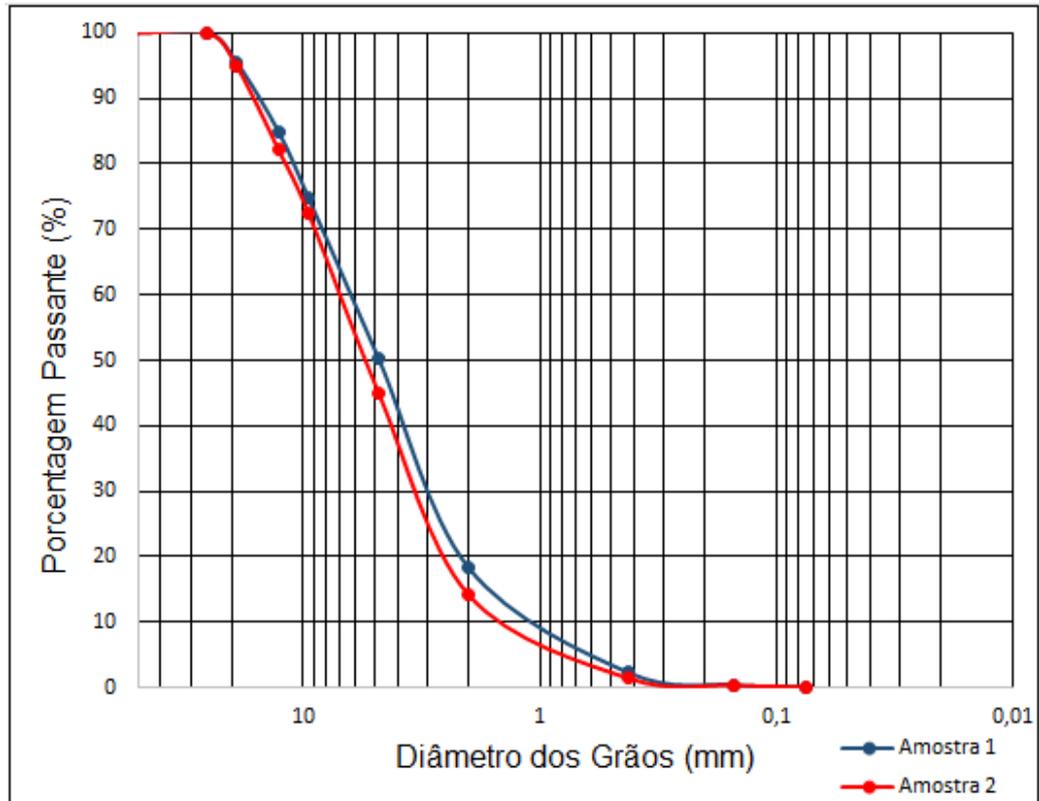
Foram separadas duas amostras do material fresado para que fossem realizados os ensaios de granulometria e extração do betume. A Tabela 5 e a Figura 25 apresentam a distribuição granulométrica do material antes da extração do ligante asfáltico.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica das amostras de material fresado

Peneira	Abertura (mm)	% Passante Amostra 1	% Passante Amostra 2
2"	50,8	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00
3/4	19,1	95,48	94,89
1/2	12,7	84,88	82,11
3/8	9,5	74,82	72,46
Nº 4	4,8	50,27	45,03
Nº 10	2	18,33	14,19
Nº 40	0,42	2,30	1,45
Nº 100	0,15	0,46	0,39
Nº 200	0,075	0,17	0,16

Fonte: Elaboração própria

Figura 25 – Gráfico da distribuição granulométrica das amostras de material fresado



Fonte: Elaboração própria

A porcentagem de betume do material utilizado neste estudo foi realizada conforme a DNER-ME 053/94, com extrator centrífugo tipo Rotarex, apresentado na Figura 26, no Laboratório de Solos, da Universidade Federal do Pampa.

Figura 26 – Aparelho extrator de betume



Fonte: Elaboração própria

Os resultados estão apresentados na Tabela 6, o teor de betume médio encontrado para as amostras foi de 8,73%.

Tabela 6 – Teor de betume

Amostra	Teor (%)	Média (%)
Amostra 1	8,78	8,73
Amostra 2	8,68	

Fonte: Elaboração própria

3.3.2 Agregados

Nesta pesquisa foram utilizados agregados naturais (brita 3/4 e 3/8) e pó de brita. Isso se justifica, pois, o material fresado oriundo de revestimento asfáltico será incorporado em camadas granulares de pavimentos flexíveis, sendo necessário à sua estabilização com agregados para a elaboração da mistura. Os agregados foram obtidos da pedreira Pedra Rosada, no Km 585 da BR 290 no município de Alegrete/RS.

Foram realizados ensaios de caracterização neste material, baseado nas seguintes normas:

- Análise granulométrica (DNER 083/98);
- Massa específica (DNER ME 195/97);
- Absorção (DNER ME 195/97);
- Massa Unitária Solta.

Na Tabela 7 estão apresentadas as características tecnológicas dos agregados utilizados na pesquisa.

Tabela 7 – Características tecnológicas dos agregados

Propriedade	Método	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra
Massa Unitária Solta	DNER 152/95	1,41	1,40	1,36
Massa Específica Compactada	DNER ME153/97	1,48	1,52	1,49
Absorção (%)	DNER ME195/97	1,54	2,69	-
Massa Específica g/cm ³	DNER ME195/97	2,70	2,68	-

Fonte: Elaboração própria

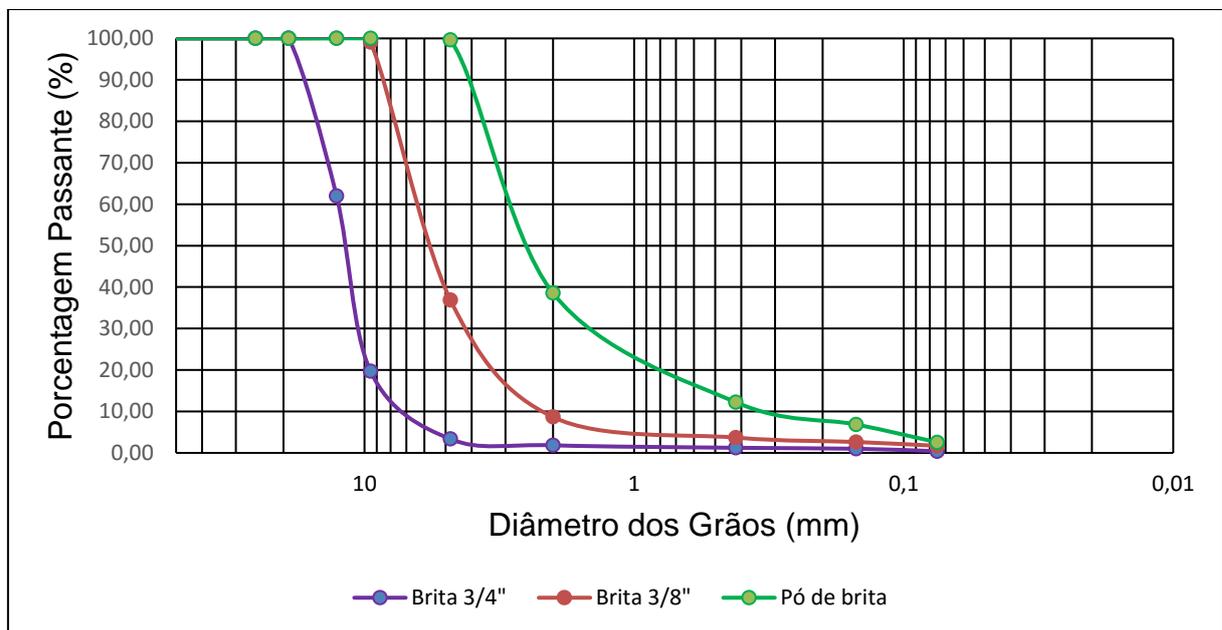
A Tabela 8 e a Figura 27 apresentam as características granulométricas dos agregados que foram utilizados para composição da mistura.

Tabela 8 – Distribuição granulométrica dos agregados

Peneira	Aberutra (mm)	% Passante Brita 3/4"	% Passante 3/8"	% Passante 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	62,01	100,00	100,00
3/8	9,5	19,73	99,13	100,00
Nº 4	4,8	3,35	36,90	99,62
Nº 10	2	1,84	8,66	38,58
Nº 40	0,42	1,24	3,70	12,24
Nº 100	0,15	1,00	2,63	6,86
Nº 200	0,075	0,40	1,71	2,55

Fonte: Elaboração própria

Figura 27 – Gráfico da distribuição granulométrica dos agregados



Fonte: Elaboração própria

3.3.3 Cimento Portland

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado como aglomerante o Cimento Portland Pozolânico CP IV-32 produzido pela Cimpor. O cimento foi utilizado na

estabilização química das misturas, com diferentes teores conforme citado anteriormente.

A ABNT NBR 5736/1991 – Cimento Portland Pozolânico define o cimento como aglomerante hidráulico obtido pela mistura de clínquer Portland e materiais pozolânicos. Neste tipo de cimento as características físicas deverão obedecer aos limites da ABNT NBR 5736/1991.

3.4 Procedimentos

Os procedimentos realizados estão descritos a seguir, apresentando sua importância e as práticas empregadas.

3.4.1 Estabilização granulométrica

A sistemática empregada para estabilização granulométrica da mistura deve atender a especificação do DNIT 141/2010 – ES. São apresentadas seis faixas (A, B, C, D, E e F), onde estão em função do número N. Para valores de número N abaixo de 5×10^6 podem ser utilizadas as duas últimas faixas. Na tabela 9 estão apresentadas as faixas determinadas pelo DNIT (2010).

Tabela 9 – Especificação granulométrica para bases estabilizadas - DNIT 141/2010

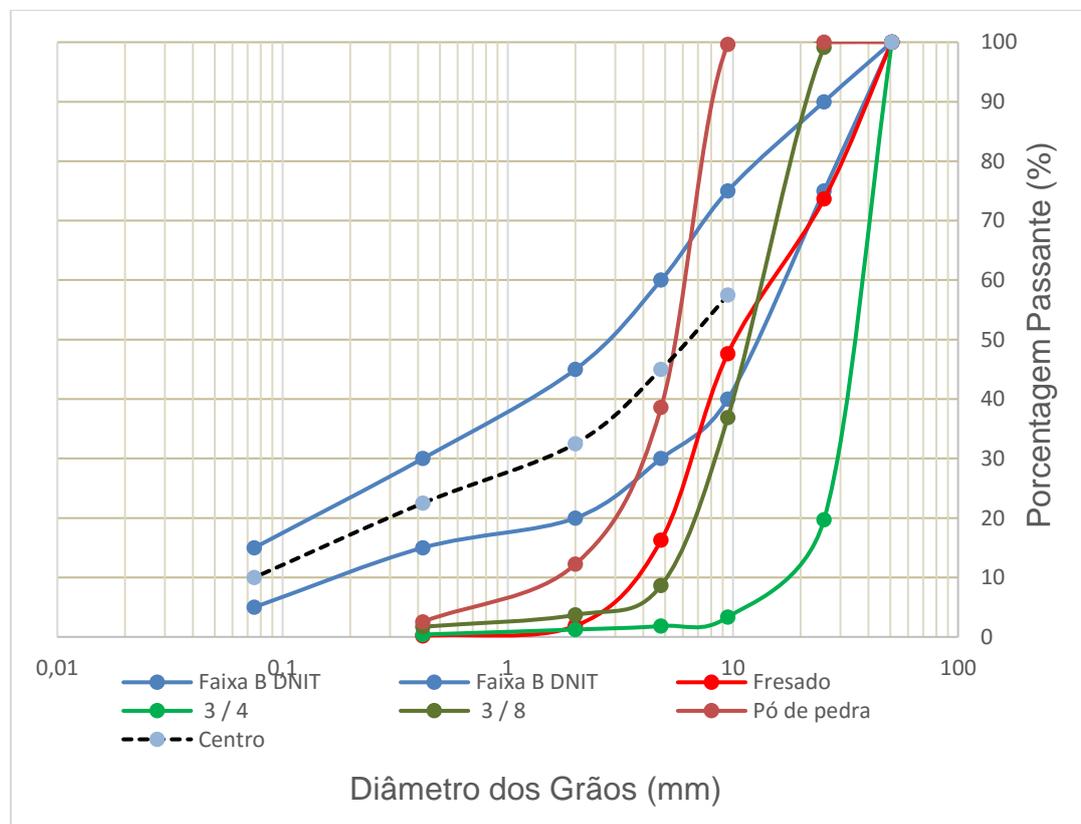
Faixas projeto	N < 5 x 10 ⁶						Tolerância da Faixa de Projeto
	N > 5 x 10 ⁶				E	F	
Peneiras	% em peso passando						
2	100	100	-	-	-	-	+/- 7
1"	-	75 - 90	100	100	-	-	+/- 7
3/8"	30 - 65	40 - 75	50 - 85	60 - 100	100	100	+/- 7
n 4	25 - 55	30 - 60	35 - 65	50 - 85	55 - 100	70 - 100	+/- 5
n 10	15 - 40	20 - 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 (2010, p.3)

Analisando a Tabela 9 observa-se que as faixas E e F admitem mais materiais finos que as demais, podendo chegar a conclusão de que possuem um desempenho inferior, justificando então o seu uso para valor N menores. Nesta pesquisa será evitada tais faixas.

A partir das distribuições dos grãos dos materiais disponíveis (fresado, brita e pó de pedra), obtida através do ensaio de granulometria, tentou-se dosar uma mistura que se enquadre em uma faixa de serviço recomendada pela especificação de serviço. Inicialmente se analisou as curvas dos materiais juntamente com a faixa de projeto. A Figura 28 apresenta a faixa de projeto B e as granulometrias dos materiais.

Figura 28 – Comparativo granulometria dos materiais e faixa B DNIT



Fonte: Elaboração própria

Conforme observado na Figura 28 os materiais não se enquadram próximos ao limite da faixa B. Também é notório que a composição granulométrica do material fresado é muito próxima ao da brita 3/8. Se estabeleceu então uma proporção de material fresado e de agregado virgem, de forma que se conseguisse enquadrar a mistura na faixa com a menor quantidade de agregado virgem possível, pois o uso

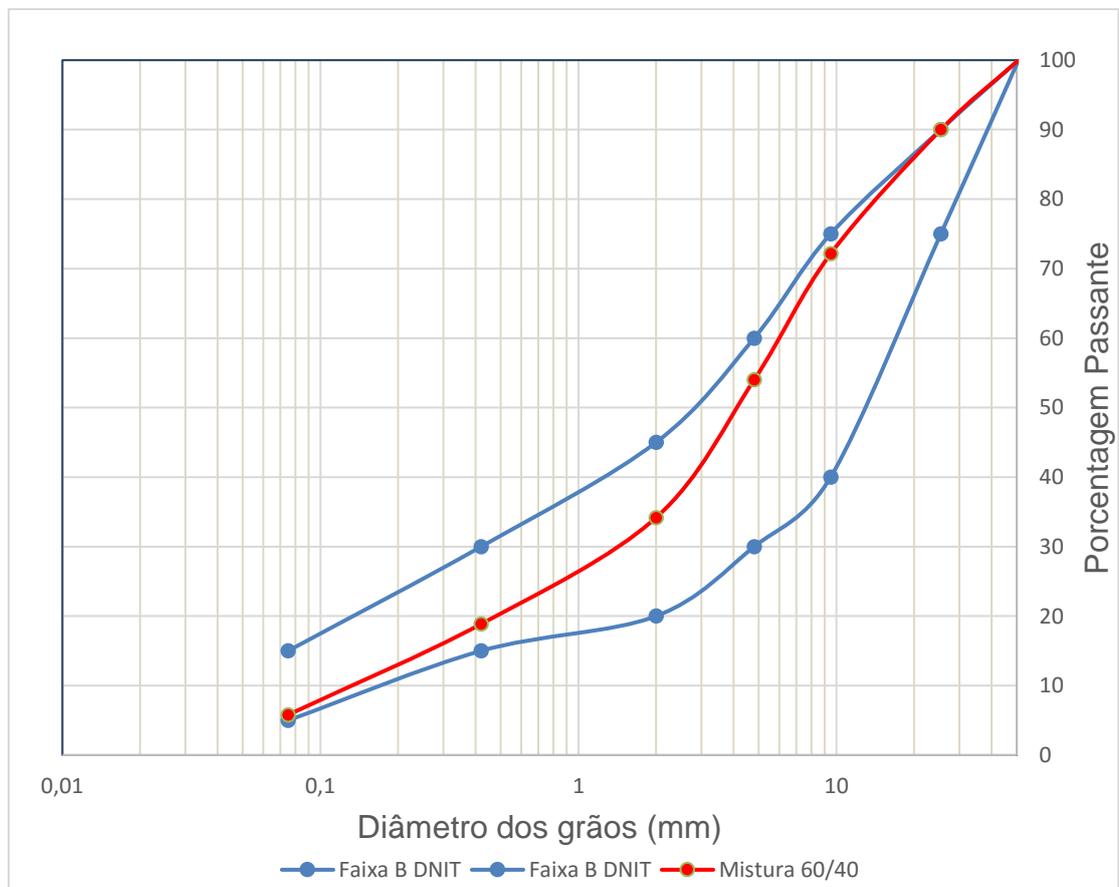
elevado de tais materiais além de não ser favorável no ponto de vista ambiental, acarretaria um maior custo da mistura em virtude do custo do insumo e a distância de transporte.

Desta forma, por inúmeras tentativas e erros, se encontrou a proporção de 60% de material fresado e 40% de agregados virgens. Esta mistura se enquadrou dentro da faixa B do DNIT, sendo o material virgem utilizado em 15% de brita 3/4" e 25% de pó de pedra. O pó de pedra foi adicionado de forma fracionada por peneira, pois se fez necessário mais material da peneira 200.

Durante a composição da mistura o material do pó de brita era separado de acordo com a granulação de cada peneira e adicionado as frações específicas de cada uma na mistura.

A Figura 29 apresenta os resultados obtidos para mistura 60/40 comparadas com a faixa B do DNIT.

Figura 29 – Projeto de estabilização granulométrica mistura 60/40



Fonte: Elaboração própria

3.4.2 Compactação

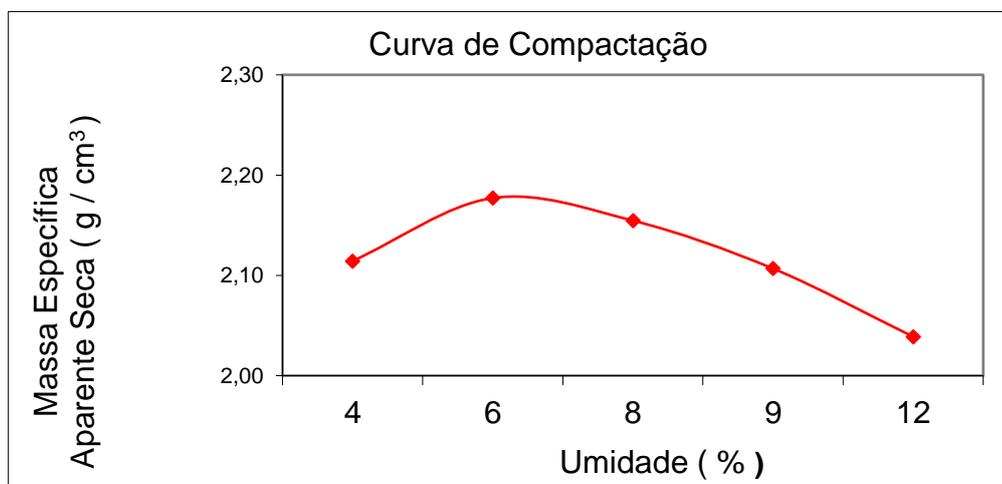
A compactação de um material trata-se da operação na qual se reduz os vazios através da sua compressão utilizando meios mecânicos (SENÇO, 2008). Do ponto de vista do comportamento mecânico a compactação de um solo ou mistura é realizada para se obter as resistências e módulo de resiliência desejável de um determinado material (BALBO, 2007).

Para Massad (2003), existem vários tipos de ensaios de compactação, que se dividem em ensaio de campo e de laboratório, como é o caso do proctor, que foi introduzido no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, apresentando diferentes alternativas à realização do ensaio e outros.

Neste estudo, a mistura granulometricamente estabilizada 60/40, foi submetida ao ensaio de compactação. Foi utilizada a Energia Modificada por se tratar de uma técnica bastante usual para materiais granulares no Rio Grande do Sul. É normatizada pelo DNER ME 162/94 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.

A mistura devidamente homogeneizada foi fracionada em cinco partes iguais onde foram adicionadas diferentes quantidades de água. Na Figura 30 é apresentada a curva de compactação e na Tabela 10 estão apresentados os valores de umidade e massa específica aparente.

Figura 30 – Curva de compactação para mistura 60/40



Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de compactação da mistura

	Massa específica aparente seca (g/cm ³)	Umidade ótima (%)
Mistura 60/40	2,18	5,88

Fonte: Elaboração própria

Como o volume dos corpos de prova são conhecidos e já encontrado o valor da massa específica aparente foi possível então calcular a massa de material necessário para moldagem. Com o valor da umidade ótima se definiu a quantidade de água utilizada na mistura. Os valores da dosagem para cada CP estão expostos na Tabela 11. A Figura 31 apresenta o molde do ensaio de compactação.

Tabela 11 – Dosagem dos corpos de prova ensaiados

Ensaio	Teor de cimento (%)	Peso CP (g)	Fresado (g)	Agregados virgens (g)	Cimento (g)	Água (g)
RCS	2,0	3424,3	1892,7	1261,8	68,5	201,4
RCS	3,5	3424,3	1861,9	1241,3	119,9	201,4
RCS	5,0	3424,3	1831,1	1220,7	171,2	201,4
RTCD/MR	2,0	1087,2	600,9	400,6	21,7	63,9
RTCD/MR	3,5	1087,2	591,1	394,1	38,1	63,9
RTCD/MR	5,0	1087,2	581,4	387,6	54,4	63,9

Fonte: Elaboração própria

Figura 31 – Execução do ensaio de compactação



Fonte: Elaboração própria

3.4.3 Resistência à compressão simples (RCS)

Para melhor entender os efeitos da eficiência de compactação, foram analisadas as tensões de ruptura à compressão. No ensaio de RCS consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico a um carregamento axial até a ruptura do mesmo. Este ensaio é amplamente empregado na dosagem e controle das características de cimento Portland e solo-cimento.

Os materiais empregados em pavimentação comumente apresentam elevada deformação quando submetidos a uma determinada carga, assim determina-se a resistência a compressão simples controlando a velocidade pelo deslocamento do prato da prensa. Esta propriedade é determinada aplicando um carregamento crescente de compressão axial, sem tensão de confinamento, em corpos de prova cilíndricos de altura correspondente a pelo menos duas vezes seu diâmetro. Nesta pesquisa se utilizará uma velocidade de 1,0 mm/min.

A norma utilizada nesta pesquisa foi a DNER – ME 201/94 – Solo-cimento – compressão axial dos corpos de prova cilíndricos. Também foram seguidas alguns parâmetros da norma NBR 11803/2013 - Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos e ABNT NBR 12261/2013 - Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento.

As amostras contendo as misturas com diversos teores de cimento foram moldadas em corpos de prova cilindros de 10 X 20 cm e respeitadas o tempo de cura. A resistência à compressão axial do corpo de prova foi calculada dividindo a carga de ruptura pela seção transversal do corpo de prova, conforme a Equação 3.

$$R = \frac{4F}{100.\pi.d^2} \quad \dots (3)$$

Sendo:

Rcs: Resistência à Compressão Simples (MPa);

F: carga de ruptura (N);

d: diâmetro do corpo de prova (cm).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Pampa. A Figura 32 apresenta a execução do ensaio.

Figura 32 – Execução do ensaio de resistência a compressão simples



Fonte: Elaboração própria

3.4.4 Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

A resistência a tração é um parâmetro de grande importância no estudo de materiais de pavimentação, porém devido à grande dificuldade de se obter a resistência à tração diretamente, variados métodos têm sido desenvolvidos para sua determinação. No Brasil o ensaio de compressão diametral é utilizado para determinação indireta da resistência a tração.

O ensaio de compressão diametral ou Brazilian Test, foi proposto pelo prof. Luís Fernando Lobo Carneiro, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, constitui-

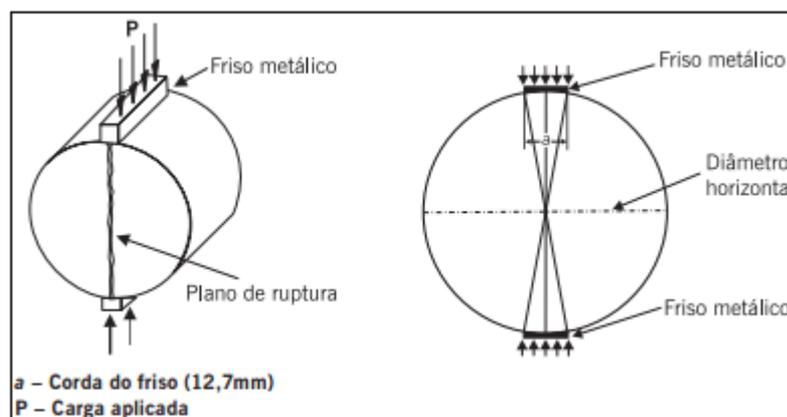
se de arranjo simples que permite impor um plano de ruptura similar ao plano de aplicação da carga (BALBO, 2007).

A disposição deste ensaio considera duas forças de compressão aplicadas no cilindro em sentidos diametralmente opostos. Essas forças geram ao longo do diâmetro solicitado tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. Neste ensaio se utiliza o mesmo corpo de prova cilíndrico e equipamento para obtenção da resistência à compressão do cimento Portland, por esse motivo se tornou um ensaio bastante popular em todo o mundo (BERNUCCI et al.2008).

Trata-se de um ensaio bastante empregado para medir resistência a tração indireta de concretos asfálticos (BERNUCCI et al.2008). Mas este mesmo ensaio e seus cálculos podem também ser utilizados em corpos de prova de solo-cimento ou material estabilizado quimicamente (MEDINA; MOTTA, 2015 apud CERTTI, 1991).

No Brasil a norma referência para este ensaio é DNIT – ME 136/210 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Para este ensaio a norma possibilita que a amostra seja obtida diretamente da pista por extração ou por meio de sonda rotativa ou moldado em laboratório (Marshall), o corpo de prova cilíndrico deverá ter 10cm de diâmetro e altura de 6,5 cm, com altura mínima da amostra de 3,5 cm. A Figura 33 ilustra o esquema de montagem para realização do ensaio.

Figura 33 – Esquema ensaio de compressão diametral



Fonte: Bernucci et. al.(2008, p. 309)

Para esta pesquisa foi utilizado o corpo de prova moldado em laboratório. As amostras depois de moldadas foram encaminhadas a um sistema de refrigeração por duas horas para que se atingisse temperatura de 25°C. Após esta etapa o corpo

cilíndrico foi colocado com a superfície entre dois frisos metálicos, curvos em uma das faces, com comprimento igual ao dobro do corpo de prova. A aplicação da carga foi realizada de forma progressiva com velocidade de deformação 0,8 mm/s até a ruptura.

Com o valor da carga se ruptura foi calculada a resistência a tração, através da Equação 4. A Figura 34 apresenta a execução do ensaio.

$$\sigma_r = \frac{2F}{100\pi \cdot D \cdot H} \quad \dots (4)$$

Onde:

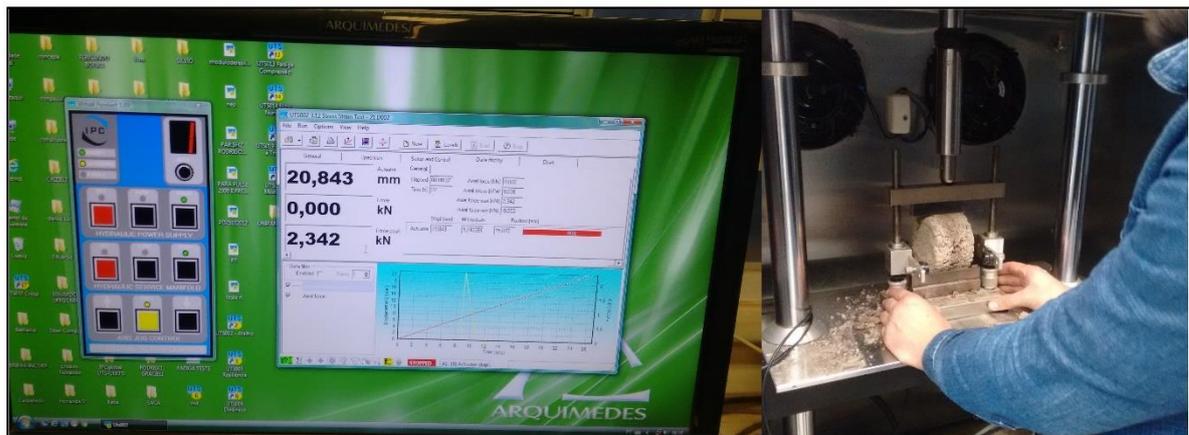
σ_r – resistência à tração, em MPa ;

F – carga de ruptura, em N;

D – diâmetro de corpo-de-prova, em cm;

H – altura do corpo-de-prova, em cm

Figura 34 – Execução ensaio de compressão diametral



Fonte: Elaboração própria

3.4.4 Módulo de resiliência (MR)

O termo resiliência trata-se da energia armazenada em um material deformado elasticamente, a qual é devolvida quando acabam as tensões causadoras das deformações, corresponde a energia potencial de deformação. É comum o uso desse termo em materiais de revestimentos asfálticos ao invés de deformação elástica, visto que sua deformação é muito maior do que nos demais sólidos comumente utilizados na engenharia, como aço e concreto (MEDINA e MOTTA, 2015).

Para Balbo (2007) o módulo de resiliência seria a capacidade de o material não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga. O módulo resiliente dos materiais de pavimentação podem ser determinados em campo ou em laboratório. No último, o valor do módulo resiliente é obtido através da relação entre a tensão aplicada e a respectiva deformação sofrida, conforme a Equação 05.

$$Mr = \frac{\sigma}{\xi} \quad \dots (5)$$

Onde:

Mr – Módulo de resiliência;

σ – tensão aplicada;

ξ – deformação;

Balbo (2007) complementa que os materiais não apresentam módulo de elasticidade constante, dificilmente o material apresentará um comportamento elástico linear. O material pode ser inicialmente mais sensível ao carregamento, de forma que sejam necessárias maiores aplicações de cargas para estabilização de uma deformação plástica inicial excessiva, que não pode ser utilizada no cálculo de sua deformação resiliente. Existem ainda materiais, como as misturas asfálticas, que possuem níveis de deformação dependentes do tempo de aplicação da carga, quanto mais rápida a ação das cargas, menor a deformação e maior o seu módulo de resiliência.

Nos EUA, desde 1986, o módulo de resiliência é adotado no dimensionamento de pavimentos asfálticos da American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. No Brasil tem-se aplicado de forma crescente o módulo de resiliência de materiais com o objetivo de uso em métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos (BERNUCCI et al.2008).

Para determinação do ensaio a ser utilizado a fim de se obter o módulo de resiliência de um material deve-se levar em consideração o tipo de material estudado. Materiais granulares, como as britas e solos devem ser analisados por ensaios triaxiais, e complementados com resultados do ISC. Quando se trata de materiais asfálticos e cimentado, são utilizados ensaios diametrais que determinam o MR pelo método de tensões indiretas (PIRES, 2014).

Neste estudo, por se tratar de um material cimentado, o ensaio utilizado foi o de compressão diametral, seguindo a norma da American Society For Testing and

Materials, ASTM D4123: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures.

No ensaio de carga repetida é procurado simular as condições de campo, em que a força aplicada atua no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo, e depois diminui até atingir um patamar inferior, para atuar após pequeno repouso (fração de segundo). A amplitude e o tempo de repouso dependem da velocidade do veículo e a profundidade na qual se calcula as tensões e deformações produzidas (MEDINA e MOTTA, 2015).

A Figura 35 trata-se de um registro da execução do ensaio de módulo de resiliência.

Figura 35 – Execução ensaio de módulo de resiliência



Fonte: Elaboração própria

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, estão apresentados e analisados os resultados obtidos através dos ensaios de resistência a compressão simples, resistência a tração por compressão diametral e módulo de resiliência, realizados em corpos de prova com misturas de diferentes teores de cimento Portland Pozolânico CP IV-32.

4.1 Resistência à Compressão Simples

A fim de verificar as propriedades mecânicas do material, foram realizados os ensaios de resistência a compressão simples (RCS) no laboratório de materiais de construção civil da UNIPAMPA – Campus Alegrete. Nesse grupo foram ensaiados 12 corpos de prova. As cargas de ruptura e as médias dos resultados obtidos nos ensaios para resistência a compressão simples, para 7 e 28 dias de cura e para os três teores de cimento definidos estão apresentados na Tabela 12.

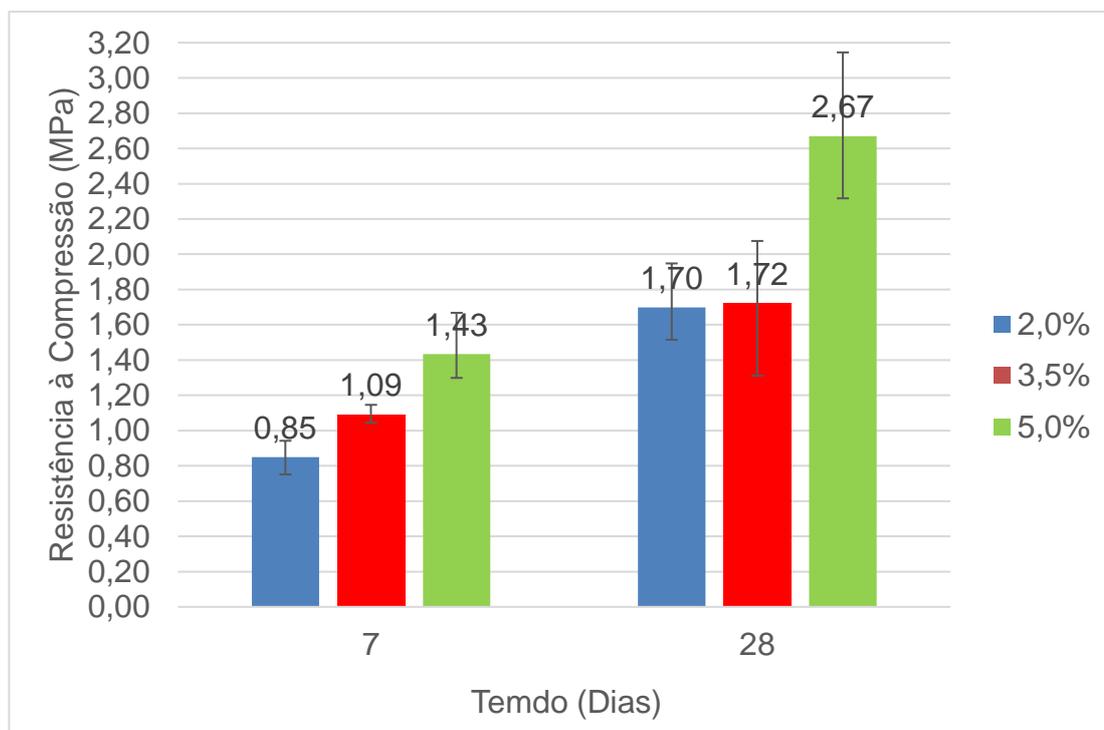
Tabela 12 – Resultados médios de resistência à compressão simples (MPa)

Teor	Idade CP	F Rup. (kN)	RCS (MPa)	Média (MPa)	Sd	CV %
2,0%	7 dias	7,4	0,942	0,85	0,096	11%
		5,9	0,751			
		6,7	0,853			
	28 dias	11,9	1,515	1,70	0,224	13%
		12,8	1,630			
		15,3	1,948			
3,5%	7 dias	9,0	1,146	1,09	0,051	5%
		8,5	1,082			
		8,2	1,044			
	28 dias	16,3	2,075	1,72	0,385	22%
		10,3	1,311			
		14,0	1,783			
5,0%	7 dias	10,2	1,299	1,43	0,203	14%
		13,1	1,668			
		10,5	1,337			
	28 dias	20,0	2,546	2,67	0,427	16%
		24,7	3,145			
		18,2	2,317			

Fonte: Elaboração própria

A Figura 36 mostra as curvas de resistência a compressão em relação a idade dos corpos de prova com 7 e 28 dias de cura.

Figura 36 – Valores da resistência à compressão média das misturas



Fonte: Elaboração própria

A partir da análise da Tabela 12 e a Figura 36 se observa que a resistência média aos 7 dias apresentou valores entre 0,85 MPa e 1,43 MPa, já no que tange à resistência média aos 28 dias esses valores ficam entre 1,70 MPa e 2,67 MPa. A mistura que apresentou a maior resistência a compressão foi a com teor de 5%, sendo essa de 2,67 MPa.

É evidente um aumento de resistência com o aumento no teor de cimento na mistura, conforme o esperado. Entretanto, a mistura com teor de 3,5% de cimento apresenta valores significativamente inferiores de ganho de resistência com influência do tempo de cura em comparação aos demais teores. Tal informação fica mais visível na Tabela 13, onde estão apresentados os valores das diferentes taxas de crescimento, a resistência à compressão simples, entre os períodos de 7 e 28 dias.

Tabela 13 – Taxa de crescimento da resistência à compressão (%)

Mistura	7 a 28 dias
2%	100,00
3,50%	57,98
5%	86,09

Fonte: Elaboração própria

A análise da Tabela 13 mostra que a maior taxa de crescimento a resistência de compressão foi na mistura com adição de 2% de cimento, com valor de 100% entre 7 e 28 dias. A mistura com 5% apresentou um ganho bastante elevado de 86,09% e a mistura com 3,5% atingiu uma taxa de crescimento inferior, de 57,98%.

Uma justificativa para a baixa taxa de crescimento de RCS, comparado com os demais percentuais, para mistura com 3,5% de cimento aos 28 dias, pode estar relacionado a dosagem dessa mistura (definição da umidade ótima), ou à problemas específicos, ocorridos nos corpos de prova com dimensões de 10 x 20 cm com teor de 3,5% cimento.

Vale ressaltar que além do elevado coeficiente de variação, o que indica uma dispersão nos dados, para os corpos de prova moldados com 3,5 % de teor de cimento com idade a 28 dias, eles também apresentam uma amplitude alta de barras de erro, o que torna o resultado menos confiável.

Descartando os resultados obtidos para mistura com teor de cimento de 3,5% é notório a influência dos ganhos de resistência causados pelo acréscimo do teor de cimento, bem como a importância na evolução da resistência com a idade de cura para cada teor.

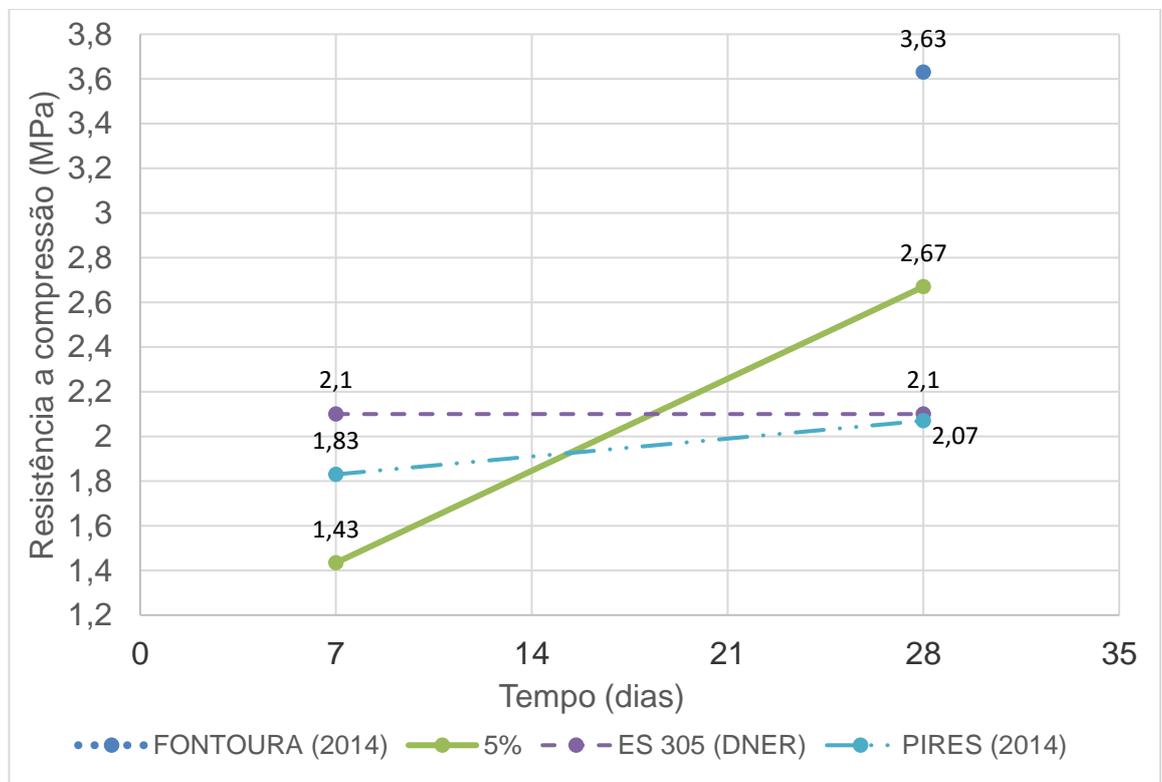
Segundo a norma ES 305 (DNER, 1997), misturas de solo e cimento empregadas na execução de camadas de base de pavimentos deverão apresentar uma resistência à compressão mínima de 2,1 MPa a 7 dias. Neste caso o material empregado não estaria de acordo. Pires (2014) comenta que se tratando de uma implantação de rodovia e dependendo das condições é aceitável este valor para a cura aos 28 dias, sendo neste caso viável o emprego da mistura com 5% de teor de cimento.

Existem trabalhos onde apresentam valores superiores de resistência encontradas, como é o caso de Pires (2014) que em sua mistura composta por 30%

de agregado virgem e 70% de material fresado estabilizado com 5% de cimento encontra resistência de 2,13 MPa. Já Fontoura (2014) encontra valor superior, de 3,63 MPa, na mistura de 80% fresado, 20% pó de pedra e 5% de teor de cimento, com corpo de prova seco. Vale ressaltar que Fontoura (2014) obteve tal valor através da relação entre a resistência de tração por compressão diametral e RCS.

A Figura 37 apresenta um comparativo dos valores de resistência encontrados nesta pesquisa da mistura com teor de 5% de cimento, o valor prescrito pelo DNER (1997) e os valores encontrados por Pires (2014).

Figura 37 – Comparativo das resistências de compressão simples



Fonte: Elaboração própria

4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para complementar o conhecimento da resistência mecânica do material, foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) no laboratório de pavimentação da UFSM – Santa Maria. O ensaio foi realizado a uma temperatura de 25°C, aplicando-se uma carga constante a uma determinada velocidade, até a ruptura do corpo de prova. O planejamento da pesquisa previa o

ensaio de 4 corpos de prova para o teor de cimento com 3,5% e 5%, com 7 e 28 dias de cura.

A Tabela 14 apresenta as cargas de ruptura de cada corpo de prova. Sendo conhecido os valores dos diâmetros e alturas dos corpos ensaiados foi possível calcular então as resistências a tração por compressão diametral de cada um. A partir dos valores das resistências foi calculado uma resistência média para cada teor e idades de 7 e 28 dias.

Está presente ainda na Tabela 14 os valores calculados dos desvios padrões bem como os valores calculados dos coeficientes de variação para cada teor em cada idade de cura.

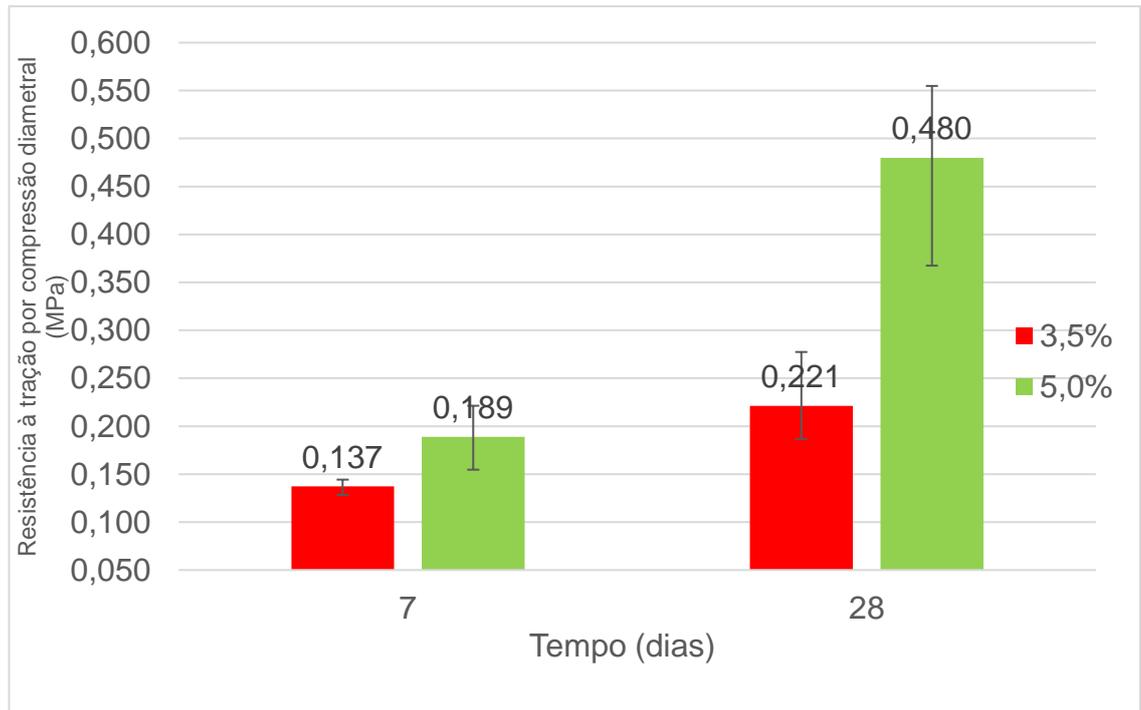
A partir dos dados da Tabela 14 e para melhor entendimento do comportamento do material, foi elaborado a Figura 38, onde é apresentada as curvas de resistência à tração de cada teor de cimento em relação aos corpos de prova, com 7 e 28 dias de cura.

Tabela 14 – Carga de ruptura média e RTCD

Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)						
Teor	Idade CP	Carga de rupt (kN)	RCTD (MPa)	Média (MPa)	Sd	CV
3,5%	7 dias	1,536	0,144	0,137	0,0067	5%
	7 dias	1,477	0,138			
	7 dias	1,490	0,139			
	7 dias	1,36	0,13			
5,0%	7 dias	2,264	0,208	0,189	0,0309	16%
	7 dias	1,888	0,172			
	7 dias	1,725	0,155			
	7 dias	2,34	0,22			
3,5%	28 dias	2,291	0,220	0,221	0,0398	18%
	28 dias	2,059	0,201			
	28 dias	1,915	0,187			
	28 dias	2,81	0,28			
5,0%	28 dias	5,320	0,488	0,480	0,0800	17%
	28 dias	4,040	0,367			
	28 dias	5,598	0,555			
	28 dias	5,15	0,51			

Fonte: Elaboração própria

Figura 38 – Valores médios da resistência a tração por compressão diametral



Fonte: Elaboração própria

Com a análise da Tabela 14 e da Figura 38 observa-se que a resistência aos 7 dias ficou entre o intervalo de 0,137 MPa e 0,189 MPa, onde o aumento das resistências seguiu a tendência conforme o aumento do teor de cimento das misturas. No que tange a resistência aos 28 dias esses valores ficaram entre 0,221 MPa e 0,480 MPa. Os valores máximos de resistência foram atingidos pela mistura com teor de 5% em ambas idades estudadas. A Tabela 15 apresenta as taxas de crescimento, quanto a RTCD.

Tabela 15 – Taxa de crescimento da RTCD (%)

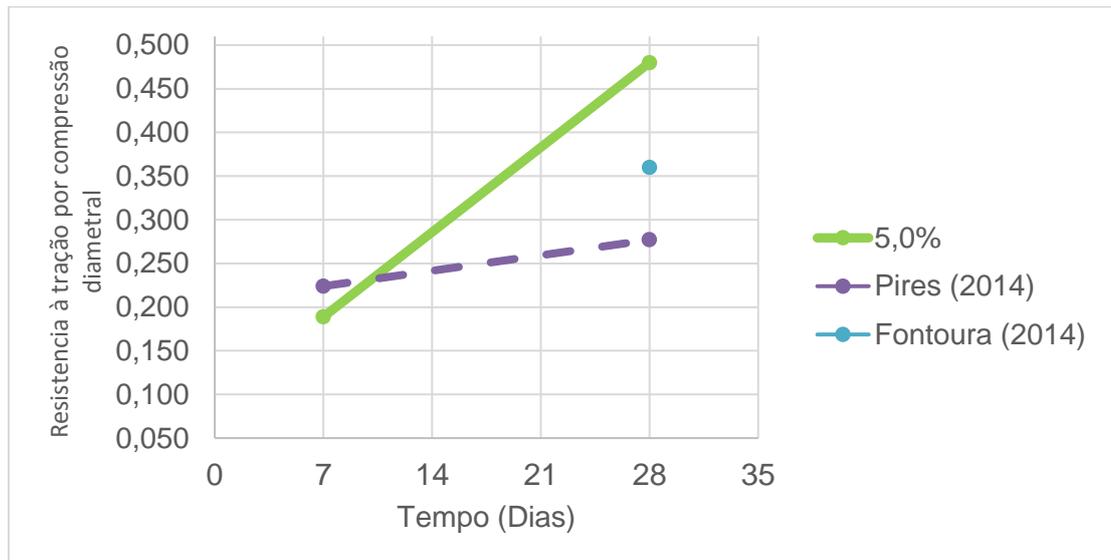
Mistura	7 a 28 dias
3,5%	61,11
5,0%	154,14

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 15 se observa que a mistura com teor de 5,0% de cimento apresentou um desenvolvimento de resistência, dos 7 para os 28 dias, de 154,11% e a de 3,5% de cimento 61,11%.

Pires (2014) em sua mistura com 70% de fresado e 30% de agregado virgem, com adição de 5,37 % de cimento na mistura encontrou valor de 0,224 MPa para resistência em idade de 7 dias, 0,277 MPa para 28 dias e 0,894 para 160 dias. Fontoura (2014) em sua pesquisa avaliou CP's seco de mistura de fresado e pó de pedra com adição de 5% de teor de cimento se obteve um valor de resistência de 0,36 MPa. A Figura 39 apresenta a comparação desta pesquisa e demais bibliografias.

Figura 39 – Comparativo das resistências de tração por compressão diametral



Fonte: Elaboração própria

A Figura 40 apresenta uma imagem do corpo de prova rompido por compressão diametral. Pode-se observar alguns pontos de quebra no material fresado, nas cores mais escuras do CP. Pires (2014) aponta que o material fresado é formado por grumos e apresenta baixa resistência, sendo um ponto fraco na estrutura. Sachet (2012) complementa que o material fresado é um agregado fraturado, devido a sua extração no campo, e que, portanto, a ruptura ocorre no agregado e não na argamassa. A autora lembra ainda que o filme asfáltico presente nos grãos de RAP desfavorece o estabelecimento de ligações de cristais de hidratação do cimento com os mesmos, podendo ocasionar redução da resistência à tração, já que é dependente da zona de transição.

Figura 40 – Amostra rompida por compressão diametral



Fonte: Elaboração própria

Alguns autores indicam que na falta de ensaios, as resistências de tração direta podem ser calculadas utilizando um coeficiente de conversão. Para concreto afirma-se que a resistência à tração corresponde à 10% da resistência à compressão. Pires et. al. (2013) valida essa transformação e assegura que a mesma possui um fator de segurança. Em seu estudo uma amostra com 5,37% de teor de cimento apresentou um RCS a 28 dias de 2,1 MPa e para o mesmo teor alcançou um acréscimo de 51,3% a resistência a compressão diametral entre as curas de 7 a 28 dias.

Para efeito de análise após encontrado os valores da resistência a compressão simples e resistência a tração por compressão diametral, foi possível calcular as relações e os resultados. Neste método é determinada porcentagem que a resistência de compressão representa para a resistência a tração. Foram utilizados os valores médios obtidos nos ensaios anteriormente. Os valores analisados estão presentes na Tabela 16.

Tabela 16 – Relação RCS para RTCD

Dias de cura	Teor	RCS (MPa)	RT (MPa)	RCS/RT
7	3,50%	1,09	0,137	12,59%
7	5,00%	1,43	0,189	13,17%
28	3,50%	1,72	0,221	12,84%
28	5,00%	2,67	0,480	17,98%

Fonte: Elaboração própria

Fica visível na Tabela 16 que nesta pesquisa todos os valores encontrados são superiores ao coeficiente de 10%. Comparando os teores nota-se que a proporção avançou com o percorrer dos dias de cura e também com a variação dos teores, como foram os casos das misturas com 3,5 % e 5,0% de teor de cimento.

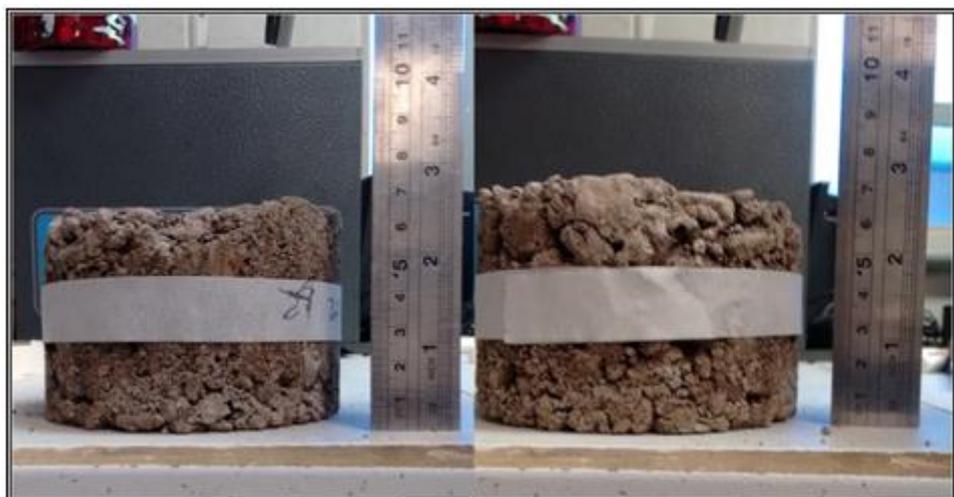
Apesar de ser comum a relação entre RCS e RTCD por diversos autores, assim como apresentado neste trabalho, não se deve tomar como uma solução absoluta os valores apresentados por esta relação. A principal recomendação é de que seja realizado o ensaio de RTCD ou RCS para as necessidades de cada projetista.

4.3 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi executado antes do ensaio RTCD, para aproveitar os mesmos corpos de prova, também no laboratório de pavimentação da UFSM – Santa Maria. Foram ensaiados para as misturas com teores de 3,5% e 5,0% com idades de 7 e 28 dias.

Vale salientar que cada CP passou por duas etapas de ensaio, a primeira a 0° e a segunda a 90°. Esse procedimento é justificado para se obter valores mais consistentes, principalmente no caso desta pesquisa, onde os corpos de prova apresentaram uma irregularidade nas alturas, em virtude de dificuldades encontradas no momento da moldagem, como pode ser observado na Figura 41.

Figura 41 – Irregularidades do corpo de prova



Fonte: Elaboração própria

Para confecção da Tabela 17 foi necessário calcular um valor de módulo de resiliência parcial para cada corpo de prova, trata-se da média dos valores encontrados a 0° e 90°. Após calculado o MR parcial de cada CP foi calculado um MR médio para cada mistura com diferentes teores a 7 e 28 dias. Foram calculados ainda o desvio padrão e o coeficiente de variação. A seguir estão apresentados os valores encontrados.

Tabela 17 – Módulo de resiliência

Teor	Idade CP	MR médio (MPa)	MR médio (MPa)	Sd	CV (%)
3,5%	7	4210,5	3599,9	886,4	25%
		4228			
		2684			
		3277			
5,0%	7	5709	5262,6	891,0	17%
		5594			
		4111,5			
		5636			
3,5%	28	5399,5	5738,4	486,2	8%
		6084			
		5143,5			
		6326,5			
5,0%	28	8472,5	8666,1	862,3	10%
		8157,5			
		9783,5			
		8251			

Fonte: Elaboração própria

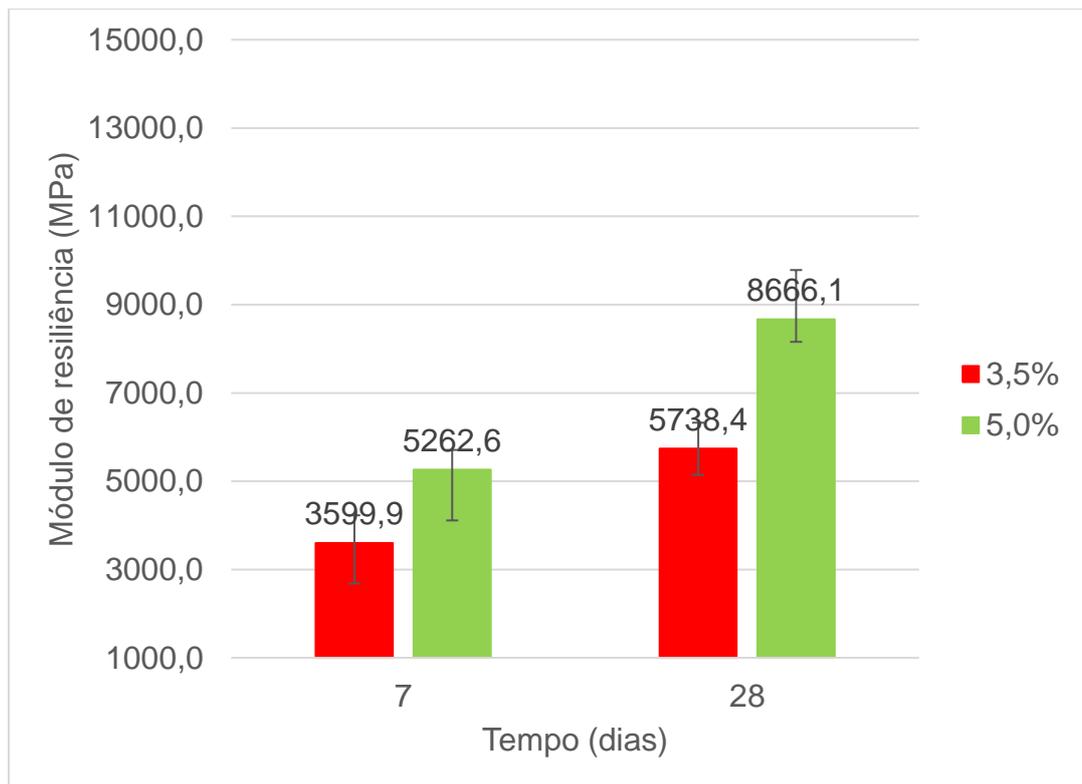
Para o período de cura de 7 dias os valores variaram entre 3599,9 MPa e 5262,0 MPa. Nesta idade o crescimento dos módulos de resiliência ocorreu conforme o aumento do teor de cimento na mistura. Quando se utiliza o teor de 5% a 7 dias o acréscimo no módulo é de 46,18% quando comparado com o teor de 3,5% da mesma idade. Já comparando os teores para 28 dias o acréscimo obtido na mistura com 5% em relação a de 3,5% foi de 51,02%.

A mistura de 5% de cimento apresenta um acréscimo de 51% no valor do MR quando comparada com o teor de 3,5%, ambos a 28 dias. Chama a atenção também

o fato de que o módulo encontrado na mistura com teor de 5% a 7 dias ser muito próximo ao módulo da mistura com teor de 3,5% a 28 dias, uma diferença de 9,04%.

A Figura 42 apresenta os valores dos MR encontrados para cada mistura em função do tempo de cura.

Figura 42 – Valores médios módulo de resiliência



Fonte: Elaboração própria

Para complementar as informações, a Tabela 18 apresenta as taxas de crescimento, quanto ao módulo de resiliência.

Tabela 18 – Taxa de crescimento do MR (%)

Mistura	7 a 28 dias
3,5%	59,40
5,0%	64,67

Fonte: Elaboração própria

A mistura com 5% de cimento possui módulo de resiliência com valor de 5262,6 MPa a 7 dias e 8666,1 MPa a 28 dias, representando um acréscimo de 64,67% no período de cura. Na Figura 44 é possível notar que a barra de erro desta mistura aos

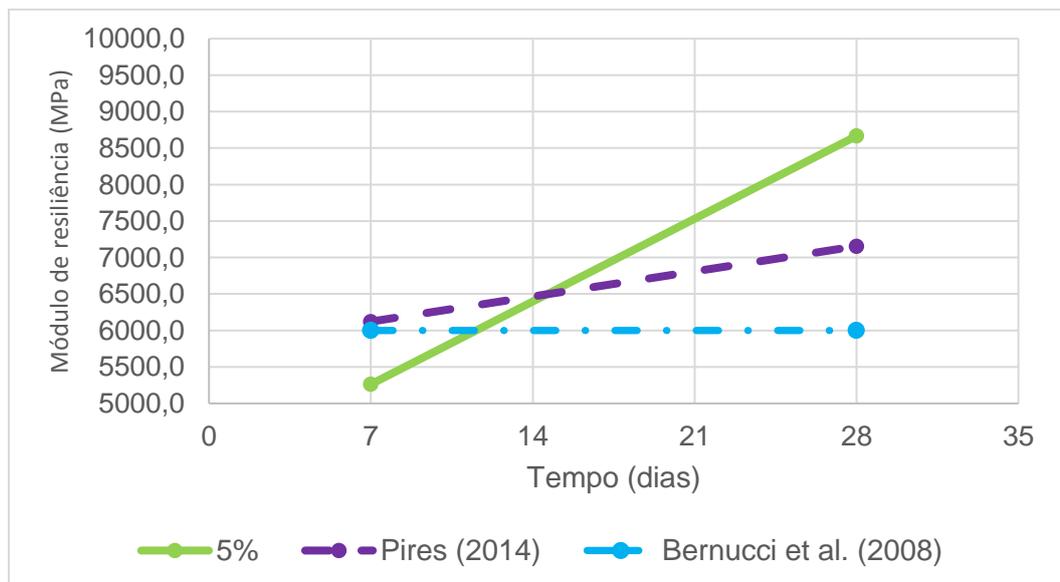
sete dias sobrepõe a barra de erro da mistura de 3,5%. Isso ocorre devido a um corpo de prova que apresentou um módulo de resiliência com valor abaixo aos demais.

A mistura com 3,5% de cimento apresentou um módulo de resiliência aos sete dias de 3599,9 MPa, onde também apresentou um corpo de prova com MR abaixo aos demais CPs. Aos 28 dias essa mistura apresentou MR de 5738,4 MPa. Isso representou um acréscimo de 59,40% de resistência durante a cura.

Bernucci et al. (2008) apresenta um módulo de resiliência para materiais graduados tratados com cimento variando entre 6000 a 12000 MPa. Neste caso a mistura com teores de 5% aos 28 dias se enquadra. Pires (2014), em sua pesquisa, encontra valores aproximadamente de 6000 MPa para 7 dias de 7000 MPa aos 28 dias, para misturas com 5,37% de cimento. O valor encontrado pelo autor a 28 dias é inferior ao dessa pesquisa, mas é importante pontuar que sua mistura apresenta uma porcentagem de material fresado maior que a utilizada nesse estudo, a tendência de redução do módulo de resiliência com o aumento do material fresado é apresentada no trabalho de Sufian et. al. (2009).

A Figura 43 apresenta uma comparação dos valores encontrados de MR na literatura e o encontrado nesta pesquisa para um teor de 5% de cimento.

Figura 43 – Comparativo dos módulos de resiliência



Fonte: Elaboração própria

Para Specht (2004) o estudo dos módulos de resiliência é um processo bastante complexo, pois sua aplicação irá depender da estrutura do pavimento que este material será inserido, logo não se pode afirmar se um valor é alto ou baixo.

A relação MR/RT além de ser um parâmetro bastante utilizado na comparação de misturas asfálticas, ela indica a compatibilidade entre a rigidez e a resistência. Materiais com módulo de resiliência elevado, podem ser considerados rígidos, carecendo assim de valores elevados de resistência a tração devido à concentração de esforços no seu interior (JUNIOR, 2008).

De acordo com Specht (2004), mantendo uma RT constante, é vantajoso uma menor relação MR/RT pois assim permitirá o uso de camadas menos espessas para mesma vida de fadiga.

Nesta pesquisa foram calculadas a relação MR/RT encontrada para as diferentes misturas com diferentes teores nas idades de 7 e 28 dias. A Tabela 19 apresenta as relações encontradas.

Tabela 19 – Relação MR/RT

Idade CP	7 dias		8 dias	
	teor	3,50%	5,00%	3,50%
MR (MPa)	3599,875	5262,625	5738,375	8666,125
RTCD (MPa)	0,137	0,189	0,221	0,480
MR/RT	26208,95	27866,02	25931,41	18055,81

Fonte: Elaboração própria

Os valores encontrados na Tabela 19 apresentam uma relação MR/RT entre 18055,81 e 27866,02. A mistura com teor de 3,5% apresenta aos 7 dias uma relação de 26208,95 que aos 28 dias é reduzido para 25931,41. Isso ocorre devido ao ganho de 61,11% de resistência a tração da mistura aos 28 dias enquanto o acréscimo do MR foi de 59,40%.

Já a mistura com 5% de cimento, inicia aos 7 dias com o maior valor da relação MR/RT e encerra os 28 dias com a relação em 18055,61, sendo inferior até mesmo a relação de 3,5% aos 7 dias. Esse processo ocorreu porque esta mistura sofreu um

acrécimo de 154,14% de resistência a tração por compressão diametral e 64,67% de módulo de resiliência.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o comportamento de um material fresado estabilizado granulometricamente com agregados virgens e quimicamente com teores de cimento (2%, 3,5% e 5,0%). Com base nos experimentos e análises realizadas no presente trabalho é possível concluir que:

Através dos ensaios de caracterização do material fresado oriundo da BR-290 dos agregados virgens coletados no município de Alegrete, foi possível compor uma mistura entre os materiais que atendesse a especificação do DNIT 141/2010. Para isso se utilizou uma mistura composta de 40% de agregados virgens e 60% de material fresado, sendo que para esta composição a mistura se enquadrou na faixa de serviço B do DNIT. A mistura apresentou um teor de umidade ótimo de 5,88% e massa específica aparente seca ótima de 2,18 g/cm³, obtendo-se desta forma sua estabilização granulométrica.

Ao fazer o ensaio de resistência a compressão simples, foram obtidos aumentos significativos de resistência das misturas de 7 para 28 dias de idade em todos os teores. O melhor desempenho foi para mistura estabilizada com 5% de teor de cimento para as duas idades. A mistura com teor de 3,5% apresentou o menor acréscimo de resistência entre 7 e 28 dias. A resistência a compressão simples da mistura com teor e 2% aos 28 dias foi muito próxima a resistência da mistura com 3,5% de cimento na mesma idade. A maior taxa de crescimento de resistência entre 7 e 28 dias foi obtida pela mistura com teor de cimento de 2%. A mistura com teor de 5% aos 28 dias se torna a mais adequada pois sua resistência atendeu o que prescreve a Norma ES 305 (DNER, 1997), atingindo resistência à compressão simples superior a 2,1 MPa.

Além disso, ao executar o ensaio de tração por compressão diametral nos CPs de cada mistura, foram obtidos, mais uma vez, aumentos significativos em suas resistências de 7 para 28 dias. Aos 7 dias as resistências aumentaram conforme o aumento do teor de cimento das misturas. A mistura estabilizada com 5% de teor de cimento apresentou as melhores resistências para 7 e 28 dias. Neste ensaio a maior taxa de crescimento foi obtida pela mistura com 5%.

Através da relação entre a RCS e RTCD médios calculados na pesquisa pode-se validar a relação de que a resistência à tração corresponde a aproximadamente

10% da resistência a compressão, com margem de segurança. Porém vale reforçar que deve-se ter parcimônia na utilização dos valores quando é feita essa relação.

A mistura com teor de cimento de 5% apresentou maior módulo em ambos períodos de cura. Baseado na literatura disponível observou que este teor aos 28 dias está dentro dos valores de MR para britas graduadas tratadas com cimento.

As misturas de teores de 3,5% e 5,00% apresentaram queda na relação MR/RT com a variação das idades dos CPs. A mistura com teor de 5,00% apresentou uma redução maior e atingiu a menor relação entre os teores, ocasionado pela alta resistência a tração da mistura.

Logo, a utilização de material fresado estabilizado granulometricamente e quimicamente se mostra extremamente viável em camadas de pavimento, uma vez que atinge resultados viáveis para sua utilização. Contudo deve-se verificar a porcentagem de aditivo químico que será colocado nas misturas, pois isso interfere significativamente no seu desempenho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 1 p.

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

_____. **NBR 12261**: Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013. 3 p.

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

ANDRADE, W.M.; SOARES, J.B.; BARROSO, S.H.A.; **Estudo da técnica da reciclagem a frio utilizando espuma de asfalto**. Disponível em <http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/281_RT.pdf>. Acessado em: 27 out. 2016.

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

ARAÚJO, A. F. A. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará**. 2009. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, UFC, Fortaleza.

ARAÚJO, L.M.D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 128 f. Tese (Doutorado em geotecnia) – Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

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.

BASHA, E. A; HASHIM, R. **Effect of cement – Rice husk ash on the plasticity and compaction of soil**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 11 p., 2003.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1ª ed. São Paulo: Oficina do texto, 2007.

BALBO, J. T.; BODI, J. **Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: alternativa para bases de elevado módulo de elasticidade**. In: XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, 2004, Florianópolis. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2004, 2004. v. I. p. 174-185.

BEHAK, L., NUÑEZ, W.P. **Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación.** *Revista Ingeniería de Construcción*. Vol. 23. N°1, 2008.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Petrobrás: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2010.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2002.

BRASILEIRO, L.L. **Utilização de agregados reciclados provenientes de RCD em substituição ao agregado natural no concreto asfáltico.** 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal do Piauí. Teresina, 2013.

BRANCO, E. F., PEREIRA, P.; SANTOS, L.P. **Pavimentos Rodoviários.** 3ªed. Coimbra: Livraria Almedina, 2008.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** 3ª ed. São Paulo: Fazendo Arte, 2011.

CABEÇAS, J.H.Z. **Reciclagem de Pavimentos na Engenharia Rodoviária,** 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Évora. Évora, 2014.

CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S.; CASSA, J.C.S. (org.). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção:** projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 312p. 2001.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT. **Pesquisa Confederação Nacional dos Transportes de rodovias 2014.** Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20LOW.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf)> Acesso em: 3 jun. 2017.

CORDEIRO, J.K. da S. **Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E&P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários,** 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.

CRISTELO, N.M.C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho. Minho, 2001.

CUNHA, C.M. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem**, 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2010.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR ES-P 31/05**: Pavimentação: Fresagem a frio. Curitiba, 2005, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ES 035/98**: Agregados – determinação de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998, 6p.

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

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER-ME 086/94**: Agregado – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994, 5p.

_____. **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 152/95**: Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1995, 3 p.

_____. **DNER-ME 153/97**: Agregados em estado compactado seco – determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 1997, 4 p.

_____. **DNER-ME 163/94**: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. 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.

_____. **DNER-ME 201/94**: Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994, 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **DNIT-ES 139/2010**: **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente** – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 8 p.

_____. **DNIT-ES 140/2010**: **Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento asfáltico** – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 9 p.

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

_____. **DNIT-ES 142/2010: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento** – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 9 p.

_____. **DNIT-ES 143/2010: Pavimentação – Base de solo-cimento** – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010, 10 p.

_____. **DNIT-ES 159/2011: Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio** – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2011, 7 p.

_____. **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**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006, 274 p.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006, 314 p.

FARIAS, E.R. **A Utilização de Misturas Solo/Cinza Pesada na Pavimentação – Análise de Aspectos de Comportamento Mecânico e Ambiental**, 2005. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

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

_____. **Pavement Recycling Guidelines for State Local Governments**. FHWA-AS-98-042, Washington, D.C. 1997.

ELY, V. **Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado**. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

FRANÇA, F.C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: Estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”**. 2003. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2003.

FWA.T.F. **The Handbook of Highway Engineering**. 1ª ed. Nova Iorque: Taylor & Francis Group, 2006.

GONÇALVES, F.J.P. **Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados**. 2002. 507 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

GRAIN, M.T.F. **Otimização da distribuição de vagões**. 1985. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1985.

HOLTZ, K., EIGHMY T. T. **Scanning European Advances in the Use of Recycled Materials in Highway Construction**. FHWA Public Roads. Vol. 64n. 1. 2000. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/.../pavements/.../publicroads/00julaug/recycscan.cfm>> Acesso em 25.nov.2016.

JUNIOR, T. T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

KLAMT, R. A. et al. **Verificação da melhoria da RCS com acréscimo de cal, cimento e cinza de casca de arroz em um solo arenoso da formação Botucatu**. VII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2003. Anais...p.65-73.

KLAMT, R. A. et al. **Utilização da Cinza da Casca de Arroz no Melhoramento das Propriedades Mecânicas de um Solo Não Laterítico da Formação Botucatu**. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016. Anais...p.19-22.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G. **Influência da variação granulométrica de brita graduada simples na deformação permanente**. In: XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, 2015, Anais, 208-219.

LOPES, L.S.E.; MALKO, J.A.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; MOTTA, L.M.G.. **Análise do comportamento de um solo estabilizado com cinzas de carvão mineral para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281243181_ANALISE_DO_COMPORTAMENTO_DE_UM_SOLO_ESTABILIZADO_COM_CINZAS_DE_CARVAO_MINERAL_PARA_APLICACAO_EM_CAMADAS_DE_BASE_DE_PAVIMENTOS>. Acessado em: 22 nov. de 2016.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação**. Notas de Aula. Juiz de Fora, 2009.

MASSAD, F. **Obras de Terra-Curso Básico de Geotécnica**. 2ª. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MEDINA, J. – **Apostila de estabilização de solos** – Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1987.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Edição dos autores, 2015. 620 p.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3rd ed. São Paulo. 2008.

NARDI, J.V. **Estabilização de Areia com Cinza Volante e Cal; Efeito do Cimento como Aditivo e de Brita na Mistura**. 1975. 179 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1975.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement Design and Materials**. New Jersey: JohnWiley & Sons, 2007.

PIMENTEL, B. G.; BENATTI, J. C. B. **Efeito da adição de cal e cinza de casca e arroz nas propriedades mecânicas de um solo tropical**. In: COBRAMSEG, 2008 Sinop, Anais, 1-9.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª. Ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2011.

PINTO, C. S. **Reutilização de material asfáltico fresado: avaliação da potencialidade de utilização em aterros rodoviários**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

PIRES, G.M. **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos**. 2014. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

PIRES, G. M.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B.; PEREIRA, D. da S.; CONCEICAO, B. M. **Estudo do material fresado estabilizado quimica e granulometricamente para aplicacao em bases de pavimentos**. In: Congresso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, 17., CILA: Guatemala, 2013.

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

RIZZO, R. P. ; LOLLO, J. A. **Capacidade de retenção de barreiras de proteção produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v.11, n.3, p. 250-259, jul./set. 2006.

RODRIGUES, P.R.A. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e a logística internacional**. 5ª Ed. São Paulo: Aduaneiras, 2014.

RODRIGUES, R.M. **Performace prediction model for asphalt overlays with geotextile interlayers on cracked pavements**. (1998) Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Georgia, 25-29, IGS – International Geotextile Society, Vol 2, pp. 973-976.

SACHET, T. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos**. 2012. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

SANTOS, R.A. **Avaliação do emprego de agregado artificial de argila calcinada em pavimentação**. 2008. 270 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ªed. V1. São Paulo: Pini, 2007.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ªed. V2. São Paulo: Pini, 2007.

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

TABORDA, L. F. **Análise de um pavimento semirrígido com base em solo, cal e cinza volante**. 2012. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

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

WIRTGEN. **Material and Process Procedure Principles for the Hot Recycling**. Germany: Wirtgen, 2003.

WIRTGEN. **The World of Wirtgen Cold Milling Machines**. Germany: Wirtgen, 2016.

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