



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

RAFAEL FALCÃO BARROS

**UTILIZAÇÃO DO REVESTIMENTO FRESADO DA
BR-104, COMO MATERIAL DE REFORÇO DA
CAMADA DE BASE E/OU SUB-BASE**

Caruaru, 2013

RAFAEL FALCÃO BARROS

UTILIZAÇÃO DO REVESTIMENTO FRESADO DA BR-104, COMO MATERIAL DE REFORÇO DA CAMADA DE BASE E/OU SUB-BASE

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 1.

Área de concentração: Estradas e transportes

Orientador: Renato Mahon Macedo

Caruaru, 2013

Catálogo na fonte
Bibliotecária Simone Xavier CRB4 - 1242

B277u Barros, Rafael Falcão.

Utilização do revestimento fresado da BR-104 como material de reforço da camada de base e/ou sub-base. / Rafael Falcão Barros. - Caruaru: O Autor, 2013.

54f; il.; 30 cm.

Orientador: Renato Mahon Macedo

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 2. Rodovias - pavimentos. 3. Material fresado. I. Macedo, Renato Mahon. (orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2013-27)

RAFAEL FALCÃO BARROS

UTILIZAÇÃO DO REVESTIMENTO FRESADO DA BR-104,
COMO MATERIAL DE REFORÇO DA CAMADA DE BASE E/OU
SUB-BASE

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Área de concentração: Estradas e transportes

A banca examinadora composta pelos professores abaixo, considera o candidato ALUNO(A) APROVADO COM NOTA 8,9.

Caruaru, 23 de abril de 2013.

Banca examinadora:

Prof.(a) Renato Mahon Macêdo, M.Sc
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof.(a) Leonardo Herszon Meira, D.Sc
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof.(a) Mauricio Oliveira de Andrade, D.Sc
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Elder Alpes de Vasconcelos
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

Dedicatória

*Aos meus pais Jailson Barros do Amaral e
Leonor Alencar Falcão Barros,
em que tenho como referência
tanto na educação como no caráter.*

*Aos meus irmãos.
Aos amigos de faculdade.*

RESUMO

Utilização do revestimento fresado da BR-104, como material de reforço da camada de base e/ou sub-base

O principal tipo de pavimento das rodovias brasileiras é flexível com revestimento asfáltico, onde encontram-se deteriorados por motivos de má execução da obra e pela falta de manutenção dessas. Os projetos de pavimentos flexíveis são geralmente feitos para uma vida útil de 9 a 10 anos com isso após esse tempo é necessário à restauração desses pavimentos. Uma técnica bastante importante é promover a utilização de material fresado, gerado na restauração através da fresagem do revestimento asfáltico, na composição de camadas estruturais de novos pavimentos. Essa técnica é economicamente viável e ecologicamente correta devido à reutilização de um subproduto da construção, diminuindo a necessidade de utilizar novos agregados e consequentemente diminuindo a extração de matéria prima do meio ambiente. Ensaio feitos avaliaram as potencialidades e a viabilidade da reutilização do material asfáltico fresado originado em serviços de restauração e duplicação da rodovia BR-104/PE nas camadas de sub-base e/ou base.

Palavras-chave: Utilização, Material fresado, sub-base, base.

ABSTRACT

Use of the coating of the milled BR-104 as the reinforcing material of the base layer

The main type of flooring of Brazilian highways is flexible coating with asphalt, which are impaired for reasons of poor performance of the work and the lack of maintenance of these. The design of flexible pavements are usually made for a useful life of 9 to 10 years with it after that time is needed to restore these floors. One technique is very important to promote the use of milled material generated by milling the restoration coating asfático, the structural composition of layers of new pavements. This technique is economically viable and environmentally friendly due to the reuse of a byproduct of building, reducing the need for new households and consequently decreasing the extraction of raw materials from the environment. Tests have evaluated the potential and feasibility of reuse of milled asphalt material originated in catering services and duplication of the highway BR-104/PE layers of sub-base and / or base.

Keywords: Reuse, Material milled, sub-base, base.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Localização da obra.....	16
Figura 2.1- Esforços atuantes no pavimento e sua Transferência de carga através da Estrutura.....	19
Figura 2.2- Distribuição das tensões em pavimentos flexíveis.....	20
Figura 2.3- Camadas do pavimento flexível.....	20
Figura 2.4- Procedimento de fresagem a frio de pavimento da BR-104/PE.....	28
Figura 3.1- Solo jazida utilizado no estudo.....	35
Figura 3.2 - Material fresado da BR-104.....	36
Figura 3.3 – Classificação segundo a TBR.....	41
Figura 4.1- Gráfico das distribuições granulométricas do solo jazida e do material Fresado.....	43
Figura 4.2 - Faixas granulométricas que devem se enquadrar os materiais constituintes de bases granulares, segundo o manual do DNIT, 2006.....	44
Figura 4.3- Gráfico do limite de liquidez.....	45
Figura 4.4- Gráfico do ensaio de compactação.....	47
Figura 4.5- Efeito da adição do material fresado nos valores de CBR.....	49
Figura 4.6- Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- A classificação dos materiais segundo os coeficientes Cu e Cc.....	40
Tabela 4.1- Resultados do ensaio granulométrico virgem.....	42
Tabela 4.2- Resultados do ensaio granulométrico do material fresado.....	42
Tabela 4.3- Valores obtidos através do gráfico de distribuição granulométrica do solo jazida puro e do material fresado.....	43
Tabela 4.4- Dados experimentais para a reta do gráfico do limite de liquidez do solo jazida.....	45
Tabela 4.5- valores dos limites de plasticidade e sua média.....	46
Tabela 4.6- Resultados do ensaios de CBR com o a variação do material fresado na Mistura.....	48
Tabela 4.7- Resultados do ensaio de resistência a compressão simples com a variação Do material fresado na mistura.....	50

LISTA DE SIGLAS

CNT: Confederação Nacional de Transporte

DC/GE/QG: Delta construções/ Galvão engenharia / Queiroz Galvão

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DER: Departamento de Estrada e Rodagem

DNER: Departamento de Nacional de Estrada e Rodagem

NBR: Norma técnica Brasileira

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CBR: *California Bearing Ratio*

ISC: Índice de Suporte Califórnia

BGS: Brita Graduada Simples

BGTC: Brita Graduada Tratada com Cimento

CCR: Concreto Compactado a Rolo

SMA: *Stone Matrix Asphalt*

PMQ: Pré-Misturado a Quente

CA: Concreto Asfáltico

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado a Quente

AAUQ: Areia Asfáltica Usinada a Quente

PMF: Pré-Misturado a Frio

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

ARRA: *The Asphalt Recycling and Reclaiming*

DOT-Texas, U.E. A : Departamento de Estradas de Rodagem do Texas

TRB : *Transportation Research Board*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa e Motivação	17
1.2	Objetivo Geral e Específicos	17
2	FUNDAMENTO TEÓRICO	18
2.1	Pavimentos	18
2.1.1	Pavimento flexível.....	19
2.2	Camadas de base, sub-base de pavimento	21
2.3	Estabilização de solos para camadas de base e sub-base	23
2.3.1	Estabilização mecânica	23
2.3.2	Estabilização física.....	23
2.3.3	Estabilização química	24
2.4	Revestimento asfáltico de pavimento	24
2.5	Fresagem do pavimento.....	26
2.5.1	Fresagem a frio.....	27
2.5.2	Fresagem a quente.....	28
2.5.3	Classificação dos tipos de fresagem.....	28
2.6	Reciclagem de pavimento.....	29
2.6.1	Reciclagem de pavimento a frio	31
2.6.2	Reciclagem de pavimento a quente	32
2.6.3	Reciclagem de pavimento profunda.....	32
2.7	Reutilização de resíduos em camadas de base e/ou sub-base	32

2.8	Ganhos ambientais com a reutilização e reciclagem do material fresado	33
3	MATERIAS E MÉTODOS UTILIZADO.....	35
3.1	Materiais	35
3.1.1	Solo jazida	35
3.1.2	Material fresado.....	36
3.2	Métodos	37
3.2.1	Coleta de materiais	37
3.2.2	Avaliação das propriedades físicas	37
3.2.2.1	Preparação de amostras para ensaios de caracterização.....	38
3.2.2.2	Análise granulométrica	38
3.2.2.3	limites de consistência.	38
3.2.3	Avaliação das propriedades mecânicas	38
3.2.3.1	Ensaio de compactação	39
3.2.3.2	Ensaio de Índice de suporte califórnia (ISC)	39
3.2.3.3	Ensaio de resistência a compressão simples.	39
3.2.4	Calculo dos coeficientes de uniformidade e curvatura e a classificação dos materiais estudados segundo o mesmo.....	39
3.2.5	Classificação do solo segundo a TBR	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Propriedades físicas	41
4.1.1	Composição granulométrica do solo jazida puro e do material fresado	41
4.1.2	Determinação dos índices físicos do solo jazida.....	45

4.1.2.1	Limite de liquidez do solo jazida	45
4.1.2.2	Limite de plasticidade do solo jazida	46
4.1.2.3	Índice de plasticidade	46
4.2	Propriedades mecânicas.....	47
4.2.1	Ensaio de compactação.....	47
4.2.2	Ensaio do CBR	48
4.2.3	Ensaio de resistência a compressão simples	50
5	CONCLUSÃO	52
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem como principal sistema de transporte de cargas e passageiros as rodovias. Segundos dados da Confederação nacional de transporte (CNT) em 2011, a malha rodoviária brasileira possui uma extensão de 212.738 km de rodovias pavimentadas e 1.368.226 km não pavimentadas. Uma pesquisa realizada pela mesma mostra que 57,4% das estradas encontram-se em condições gerais regulares, ruins ou péssimas e 42,6% são consideradas ótimas ou boas. A má qualidade das rodovias gera impactos sociais e econômicos para o país como o aumento de acidentes, custo de manutenção dos carros, maior consumo de combustíveis dos carros e atraso na entrega de mercadorias e transporte de passageiros. Tais resultados evidenciam a necessidade dos serviços de manutenção ou restauração das rodovias.

Atualmente a preocupação com a proteção ao meio ambiente e a preservação de recursos naturais faz com que soluções técnicas na área da engenharia rodoviária se preocupem em minimizar impactos ambientais causados pela construção de rodovias e manutenção delas. Novas alternativas começam a ser bastante utilizadas como a reciclagem de pavimentos e a reutilização de matérias gerados na manutenção e restauração na composição de bases e/ou sub-bases de novos pavimentos.

Uma técnica bastante utilizada na manutenção e restauração de pavimentos flexíveis é a fresagem de revestimentos asfálticos deteriorados. Nessa operação retira-se parte do revestimento antigo e então executa a manutenção exigida pela via. Esse procedimento produz resíduos (fresado asfáltico) que é constituído por areia, brita, fíler e cimento asfáltico de petróleo. Onde o mesmo pode ser reutilizado em: novos revestimentos asfálticos, misturado com solo de jazida na constituição de base e ou sub-base e também pode ser utilizado como material da camada de reforço do subleito.

Devido ao fato do material fresado ser de bom padrão de qualidade, a não reutilização desse material e o seu armazenamento é um grande desperdício de material com características boas e também proporcionar um destino ecologicamente correto a esse material, que antes era tratado como rejeito da construção civil.

A região do agreste de Pernambuco houve um crescimento econômico muito grande na última década principalmente na cidade de Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe. O setor responsável por isso é o de vestuário tanto na confecção das peças como na venda dessas. Onde grande parte é vendida através de feiras ao ar livre conjuntamente com lojas de varejos e lojas de fábrica. Com esse grande crescimento a região se tornou a maior produtora de confecções do nordeste.

A rodovia que liga essas cidades é a BR-104 PE conforme a figura 1.1, onde é considerada uma das principais vias de Pernambuco devido ao crescimento dessa região. Com o aumento considerável de fluxo de pessoas e cargas nessa rodovia foi necessário a duplicação da mesma, realizando a restauração da via existente por essa não está em boas condições de serviço e uma construção de uma nova via, com isso tornando-se uma rodovia duplicada. A licitação para execução da obra de duplicação e restauração da BR-104 foi vencida pelo consórcio Delta construções/ Galvão engenharia/ Queiroz Galvão (DC/GE/QG).

Esse trabalho busca, portanto, avaliar a potencialidade e viabilidade dos materiais fresados, através de ensaios laboratoriais, na mistura com o solo jazida da camada de base e/ou sub-base, constituídos de materiais granulares, na construção da nova via.

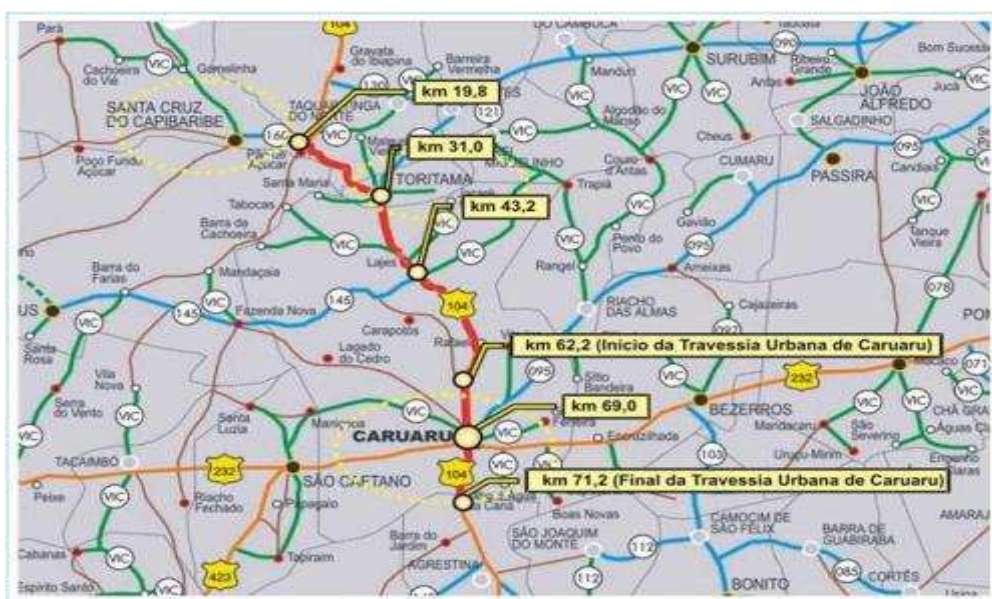


Figura 1.1 - Localização da obra

1.1 Justificativa e motivação

O mundo está cada vez mais preocupado com o futuro do meio ambiente e conseqüentemente com a qualidade de vida e sobrevivência das futuras gerações. Uma das principais preocupações é em relação a dar um destino final aos resíduos gerado pelas atividades humanas. Na área de construção de estradas e rodovias é bastante importante essa preocupação, devido ao fato de ter uma grande extração de matéria prima de jazidas e a geração de uma grande quantidade de resíduos. Outro fato importante é a necessidade de manutenção e restauração das rodovias desgastadas com isso gerando mais resíduos ao meio ambiente, que no caso dos pavimentos flexíveis são chamados de material fresado.

Por isso o reaproveitamento dos resíduos provenientes dessa atividade do sistema rodoviário é um tema importante. Esse reaproveitamento permite a conservação do meio ambiente, economia de jazidas naturais devido à menor velocidade de exploração das mesmas, diminuição do custo do pavimento uma vez que esses materiais apresentam custos inferiores aos convencionais e possibilita uma diminuição nas camadas do pavimento.

1.2 Objetivo geral e específicos

O objetivo deste trabalho é avaliar a potencialidade da utilização do material fresado, oriundo das atividades de manutenção e restauração da BR-104, como mistura na constituição das camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários.

Objetivos específicos são:

- Analisar as propriedades físicas dos materiais utilizados, no caso material fresado e solo jazida;
- Avaliar as propriedades mecânicas do solo de jazida e das misturas de material (70% solo jazida com 30 % material fresado e mistura de material 50% solo

jazida com 50% material fresado), para uso em sub-base ou base de pavimentos rodoviários;

- Dar destino final economicamente e ecologicamente correto aos materiais provenientes da fresagem do revestimento das atividades de restauração;
- Possibilitar aumento da capacidade de carga das camadas do pavimento;

2 Fundamento teórico

2.1 Pavimentos

Segundo SENÇO (1997), o pavimento é uma estrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre o terreno de fundação, considerando como semi-espaço infinito e designado como subleito. Do ponto de vista da engenharia deve ser conseguida com a máxima qualidade e mínimo custo. Essa estrutura tem como objetivos principais resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego, resistir aos esforços horizontais que nela atuam tornando mais durável a superfície de rolamento, conformes vistos na figura 2.1 e melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança.

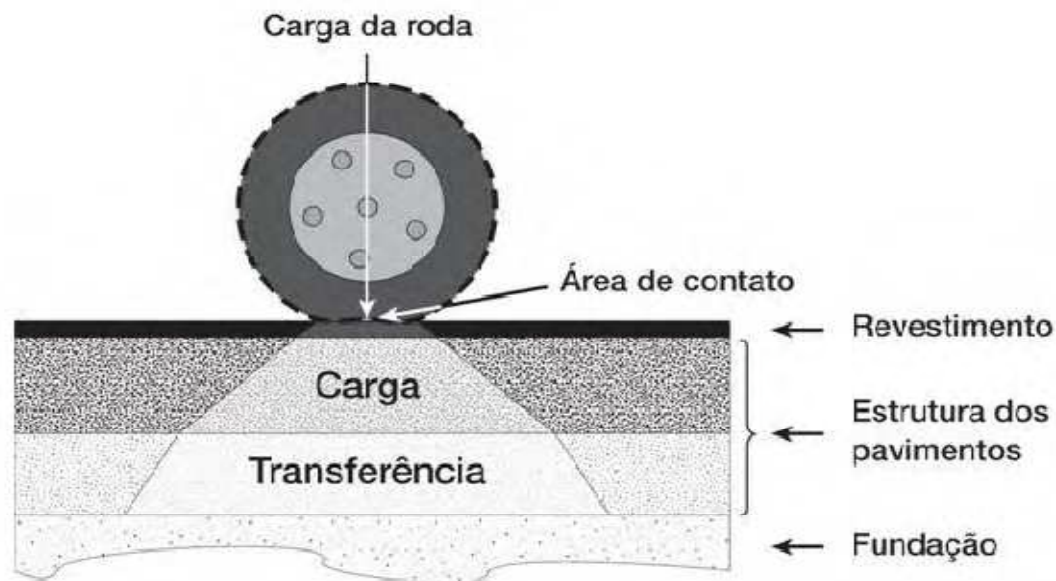


Figura 2.1 – Esforços atuantes no pavimento e sua Transferência de carga através da estrutura (WIRTGEN, 2008)

Os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, rígidos e semi-rígidos. Geralmente os pavimentos flexíveis são constituídos por revestimentos asfálticos (betuminosos) delgados sobre camadas granulares ou acima de camada de solo estabilizado granulometricamente. Os pavimentos rígidos geralmente são constituídos de placas (armadas ou não) de concreto de cimento portland apoiado sobre camadas granulares, onde essas placas possuem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Os semi-rígidos constituem uma situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis, onde é definido com sendo aquele que se utilizam principalmente de misturas do tipo solo-cal, solo-betume, solo-cimento no qual apresentam uma razoável resistência às solicitações a tração (DNIT, 2006).

2.1.1 Pavimento flexível

De acordo com a NBR 7207/82 da ABNT os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas que não trabalham a tração, exceção feita ao revestimento que pode ou não suportar esse tipo de esforço. Todas as camadas constituintes sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, com isso, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas, conforme a

figura 2.2. A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas sobrepostas, onde as melhores qualidades de materiais estão posicionadas mais próximas da carga aplicada.

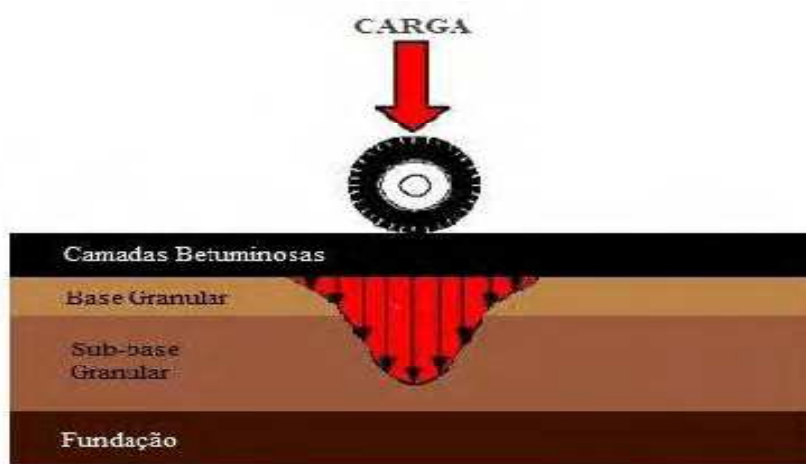


Figura 2.2 - Distribuição das tensões em pavimentos flexíveis. (DNIT, 2006).

O pavimento flexível é formado por diferentes tipos de camadas, em que as principais são: revestimento (asfáltico), base, sub-base, reforço do subleito e regularização do subleito conforme a figura 2.3. Em que todas essas camadas são apoiadas sobre o subleito.

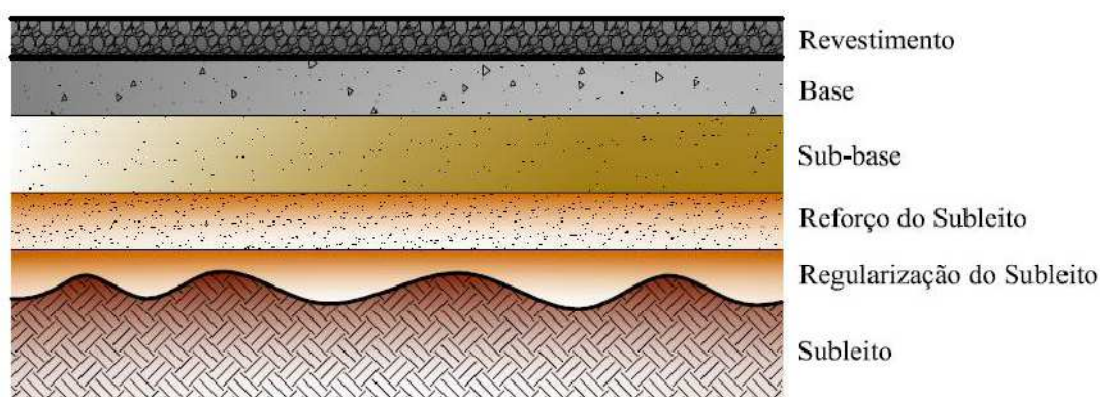


Figura 2.3 – Camadas do pavimento flexível (NECKEL, 2008)

MARQUES (2007) e NECKEL (2008) apresentam, abaixo, definição das camadas ilustradas na figura 2.3:

- **Revestimento:** é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e serve para melhorar as condições da via, proporcionando conforto e segurança. Deve resistir ao desgaste e aos esforços atuantes;
- **Base:** é a camada que resiste os esforços da superfície de rolamento e distribui ao subleito, devendo ter um ISC maior que 60%;
- **Sub-base:** é a camada que complementa a base, no caso de não ser possível executar a base diretamente no subleito regularizado ou reforço. Deve ter ISC maior que 20%;
- **Reforço de subleito:** é uma camada de espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente que serve para melhorar a qualidade do subleito no caso deste ter ISC menor que 2%;
- **Regularização do subleito:** também é conhecido como nivelamento, é a camada destinada a conformar o leito transversalmente e longitudinalmente. A existência desta camada está relacionada com as condições do subleito.
- **Subleito:** é o terreno onde o pavimento será assentado. Deve-se estudar até onde a profundidade onde as tensões irão atuar.

2.2 Camadas de base e sub-base de pavimento

São as camadas que absorvem a maior parte dos esforços oriundos do tráfego de veículos, distribuindo de forma atenuada à camada de subleito. Devido a isso tem importância direta na qualidade e durabilidade das rodovias. Por estar sempre exposta a grandes cargas essas camadas possuem em suas composições matérias que apresentam boas características mecânicas podendo resistir às cargas sem apresentar deformação considerável que prejudique o pavimento (DNIT, 2006).

Os materiais utilizados nas camadas estruturais do pavimento são usualmente constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros, podendo ser classificados segundo o seu comportamento frente aos esforços em: materiais granulares e solos, estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos (BERNUCCI, L.B, 2006).

Os materiais granulares são aqueles que não possuem coesão e que não resistem à tração, trabalha eminentemente aos esforços de compressão. Os materiais mais empregados são: Brita graduada simples (BGS), brita corrida, macadame hidráulico, macadame a seco, misturas estabilizadas granulometricamente, solo natural, solo agregado, solo melhorado com cimento e solo melhorado com cal (BERNUCCI, L.B, 2006).

Os materiais cimentados são materiais granulares ou solos que recebem adição de cimento, cal ou outro aditivo de forma a proporcionar um acréscimo significativo de rigidez do material natural e a um aumento de resistência à compressão e tração. Os materiais cimentados mais freqüentes são: brita graduada tratada com cimento (BGTC); solo-cimento; solo-cal; solo-cal-cimento; concreto rolado (CCR – concreto compactado a rolo), (BERNUCCI, L.B, 2006).

Os materiais asfálticos são aqueles em que a ligação entre agregados ou partículas é dada pelo ligante asfáltico, sendo a resistência à tração bastante superior aos solos argilosos. As misturas asfálticas mais freqüentes são: solo-asfalto; solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado (BERNUCCI, L. B, 2008).

Materiais decorrentes de reutilização e reciclagem de resíduos são cada vez mais utilizados em camadas de pavimentos. Os principais resíduos utilizados são: mistura asfáltica fresada, escória de alto-forno, agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, demolições e etc.

A reutilização de materiais provenientes dos resíduos (gerado pela fresagem de pavimentos flexíveis, construção civil e etc), misturados com materiais utilizados na construção de camadas de pavimentos (agregados, solo jazida e etc) e a reciclagem de resíduos são maneiras econômicas e ambientalmente corretas para a construção de camadas de pavimentos. No caso do material fresado é tecnicamente viável a sua reciclagem e reutilização devido ao fato de ser um material que tenha boas características, podendo aumentar a resistência da camada e conseqüentemente diminuir a espessura do pavimento (MOREIRA, 2006).

2.3 Estabilização de solos para camadas de base e sub-base

A estabilização de um solo pode ser definida como sendo a alteração de qualquer uma de suas propriedades, de forma a melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Consiste em um tratamento artificial, por um processo físico, químico ou físico-químico, tornando o solo estável para os limites de sua utilização, e ainda fazendo com que a estabilização permaneça sob a ação de cargas exteriores e também sob ações climáticas variáveis.

As propriedades de engenharia que se visa modificar na estabilização de um solo, segundo MEDINA e MOTTA (2004), são: Resistência ao cisalhamento, tornando-a menos sensível às mudanças ambientais, principalmente à umidade, além de torná-la compatível com as cargas que a estrutura vai absorver, Permeabilidade, aumentando-a ou diminuindo-a, Compressibilidade, reduzindo-a.

Podem-se destacar três métodos de estabilização de solos: mecânico, físico e químico, podendo ser adaptados e combinados para a solução de um problema.

2.3.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica por compactação refere-se ao processo de tratamento de um solo com a finalidade de minimizar sua porosidade pela aplicação de sucessivas cargas, pressupondo que a redução de volume de vazios é relacionada ao ganho de resistência mecânica. Por outro lado, a estabilização mecânica por correção granulométrica engloba as melhorias induzidas em um solo pela mistura deste com outro ou outros solos que possibilitem a obtenção de um novo produto com propriedades adequadas para determinados fins de engenharia. (SANTOS et al, 1995).

2.3.2 Estabilização física

Consiste na modificação das propriedades do solo atuando na textura, ou seja, misturando solos com diferentes frações granulométricas. Outras técnicas envolvem tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose,

que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (OLIVEIRA apud MACÊDO, 2004).

2.3.3 Estabilização química

A estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, de modo a provocar mudanças que influenciam as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade deste, atingindo-se, então o objetivo de estabilizá-lo (SANTOS et al, 1995).

Na estabilização química, como o nome indica, há uma reação química do aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou com a constituição de recheio dos poros pelo produto de reação química do aditivo com a água. No solo-cimento e solo-cal existe, inicialmente, uma reação que se caracteriza melhor como físico-química: os cátions Ca^{++} liberados pela hidratação do cimento reagem com a superfície dos argilo-minerais e modificam o pH da solução eletrolítica. Os produtos cimentantes que se formam posteriormente (diz-se reação pozolânica) crescem a rigidez da mistura (MEDINA, 1987).

2.4 Revestimento asfáltico de pavimento

O revestimento deve suportar a ação de cargas estáticas ou dinâmicas sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação. Sendo assim, essa camada deve ser provida de materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal. Dessa forma os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e de ligante asfáltico (BALBO, 2007).

Os tipos de revestimentos asfálticos são subdivididos em misturas asfálticas, tratamentos superficiais, microrevestimentos e lama asfáltica. Onde a lama asfáltica consiste de uma associação, em consistência fluida, de agregados minerais, material de enchimento (file), emulsão asfáltica e água, uniformemente misturada e espalhada no local à temperatura ambiente. Os microrevestimentos são uma mistura, a frio, de

emulsão modificada por polímeros com agregado mineral, material de enchimento, também denominado filer, água, aditivos químicos para controle da velocidade de ruptura da emulsão e, dependendo do projeto, aditivos sólidos (fibras de reforço) para melhoria das propriedades mecânicas de flexibilidade do revestimento. Os tratamentos superficiais são obtidos por aplicação separada e sequencial de ligante betuminoso e agregado mineral de granulometria previamente especificada. As misturas asfálticas são obtidas em usina, a quente ou a frio, envolvendo agregados e ligantes asfálticos, adequadamente (PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA – FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS, 2008).

Na maioria dos pavimentos brasileiros usam-se como revestimento as misturas asfálticas. Onde em casos mais comuns, até um determinado volume de tráfego, o revestimento asfáltico pode ser composto por um único tipo de mistura asfáltica. Os tipos se distinguem quanto ao local de fabricação (em usinas ou no local, que são os tratamentos superficiais), temperatura de mistura (a quente ou a frio), a composição granulométrica (densa, aberta e descontínua), (PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA – FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS, 2008).

Em caso de recomposição da capacidade estrutural ou funcional, é possível o uso de outros tipos de misturas. Onde processam em usinas móveis especiais que promovem a mistura agregados - ligante imediatamente antes da colocação no pavimento, podendo ser separados em: misturas novas relativamente fluidas (lama asfáltica e microrrevestimento), misturas recicladas com uso de fresadoras – recicladas.

Os principais tipos de revestimentos em relação a misturas usadas são: densa (concreto asfáltico, areia – asfalto, pré misturado a frio), descontínuas (SMA, porosa e gap-graid). Quanto à temperatura de mistura são a quente: pré- misturado denso ou aberto (PMQ), concreto asfáltico (CA) ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), argamassa betuminosa (areia asfalto, AAUQ) e reciclagem. A frio: em usina pré-misturado a frio denso semidenso ou aberto (PMF), no local (tratamento superficial, lama asfáltica, microrrevestimento e reciclagem), (PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA – FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS, 2008).

O tipo de revestimento mais utilizado no Brasil é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), trata-se de uma mistura de agregados minerais (naturais ou artificiais, britados ou em sua forma disponível), de material fino (pó de pedra, cimento portland e etc) e de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Tem-se a homogeneização, a quente, desses materiais em uma usina é misturada (BALBO, 2007).

Com isso deve-se realizar a dosagem desses materiais a fim de se obter uma composição granulométrica de agregados que misturada ao (CAP), em temperaturas adequadas e subsequente compactação, formem outro material. Esse material deve oferecer condições mecânicas adequadas para suportar as solicitações impostas ao pavimento (tráfego de veículos, ação do clima e etc.). Uma dosagem de mistura asfáltica visa, entre outros objetivos, obter uma mistura adequadamente trabalhável, pouco suscetível à fissuração por fadiga, com baixa deformação permanente e estável e ação de cargas estáticas ou móveis (BALBO, 2007).

2.5 Fresagem do pavimento

Segundo BONFIM (2007) define fresagem do pavimento, como corte ou desbaste de uma ou mais camadas de pavimentos, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a fria, empregado como intervenção visando à restauração do pavimento.

A fresagem destaca-se como a principal técnica de remoção de revestimentos antigos, utilizada na manutenção rodoviária com pavimento flexível. A fresagem serve para reciclagem, reutilização desse material fresado na composição de outras camadas de pavimento e na regularização da superfície de rolamento devolvendo-lhe as condições de conforto e segurança necessárias.

Existem dois tipos de processos específicos e equipamentos para a tal: o processo a frio que efetua o desbaste por meio simples abrasivo, e processo a quente, que utiliza o pré-aquecimento da estrutura para facilitar o desbaste da mesma.

2.5.1 Fresagem a frio

A fresagem a frio consiste no corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento asfáltico por meio de processo mecânico a frio, realizado na temperatura ambiente, sem o pré-aquecimento do material. É executado através de cortes por movimento rotativo contínuo, seguido da elevação do material fresado para caçamba do caminhão basculante (ET-DER-P00/038, 2006).

Segundo o DNIT (2011), Os principais tipos de equipamentos usados para essa técnica são:

- Máquina fresadora:
 - Para a execução do serviço da fresagem, deve ser utilizada máquina fresadora autopropulsionada, capaz de cortar camadas do pavimento na profundidade requerida pelo projeto, por movimento rotativo de tambor dotado de dentes ou através de tambor para microfresagem.
 - A fresadora deve ter dispositivo de regulagem de espessura da camada do pavimento a ser removida, comando hidrostático e possibilidade de fresar a frio na largura necessária.
 - A fresadora deve possuir dispositivo de elevação do material removido na pista para a caçamba de caminhões.
 - Os dentes do tambor fresador devem ser cambiáveis e permitir que sejam extraídos e montados, através de procedimento simples e prático, visando o controle da largura do corte
- Vassoura mecânica autopropulsionada e que disponha de caixa para recebimento do material, para promover a limpeza da superfície fresada;
- Caminhão (os) basculante(s);
- Caminhão tanque, para abastecimento do depósito de água da fresadora;
- Compressor de ar;
- Detector de metais;
- Serra de disco e rompedor pneumático, que permitam execução de arremates e cortes perpendiculares;

- Carreta equipada com prancha apropriada para transporte do equipamento de fresagem.

Trechos da BR-104 onde foi necessário fazer uma restauração do revestimento asfáltico foi utilizado a técnica de fresagem a frio, mostrado na figura 2.4.



Figura 2.4 – Procedimento de fresagem a frio de pavimento da BR-104/PE

2.5.2 Fresagem a quente

Na fresagem a quente existe o pré-aquecimento do revestimento, seguido da remoção da camada por processo mecânico. Com a estrutura do revestimento aquecido, o desbaste da camada pode ser comparado a uma escarificação, pois o revestimento a ser removido oferece pouca resistência ao corte devido a seu pré-aquecimento, proporcionando a extração do material fresado com pouco fracionamento dos agregados, evitando alterações significativas na granulometria do material (BONFIM, 2007).

2.5.3 Classificação dos tipos de Fresagem

Segundo BONFIM (2007), pode-se classificar a fresagem de pavimentos quanto à espessura de corte (superficial, rasa e profunda) e quanto à rugosidade resultante da pista (Padrão, fina e microfresagem).

Quanto à espessura do corte:

- **Fresagem superficial:** é destinada apenas à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento. Sendo assim, dispensa o posterior recapeamento da pista, uma vez que permite níveis mínimos de conforto e segurança. Dessa forma defeitos como exudação e deformações plásticas podem ser tratados com essa técnica;
- **Fresagem rasas:** atinge profundidades maiores, em torno de 5 cm. Esse procedimento é utilizado na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais. Aplicando principalmente em vias urbanas, onde se deseja manter o greide do pavimento;
- **Fresagem Profunda:** é aquela em que o corte atinge níveis consideráveis, podendo alcançar a camada de base e até mesmo de sub-base do pavimento. Essa técnica normalmente é utilizada em pavimentos que necessitam de reparos estruturais. Além disso, pode ser empregado em serviço pequeno porte como o requadramento de buracos.

Quanto à rugosidade resultante da pista:

- **Fresagem padrão:** é resultante do cilindro originalmente oferecido nos equipamentos. Nessa situação a distância lateral entre os dentes de corte do cilindro fresador é de aproximadamente 15mm. Empregada em projetos que especificam posterior aplicação de nova camada de revestimento;
- **Fresagem fina:** é resultado da aplicação de cilindros fresadores com distância lateral entre os dentes de corte de aproximadamente 8mm, resultando sulcos menores e menor rugosidade na pista, o que possibilita essa classificação;
- **Microfresagem:** é empregada para a remoção de espessuras muito delgadas do pavimento, sendo assim, os dentes de corte posicionam-se lateralmente a uma distância de aproximadamente 2 a 3 mm. Esse procedimento pode ser empregado na remoção da faixa de sinalização horizontal da pista, visando alterar o layout viário. Além disso, o procedimento pode ser empregado na adequação do perfil longitudinal da via, dispensando a aplicação de nova camada de revestimento.

2.6 Reciclagem de pavimento

A reciclagem de pavimentos compreende a reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento, na base e/ou na sub-base, em que os materiais são misturados novamente no estado em que se encontram após a desagregação ou tratados por energia térmica e/ou aditivados por ligantes novos ou rejuvenescedores, com ou sem recomposição granulométrica (MOMM E DOMINGUES, 1995).

A reciclagem dos pavimentos apresenta-se como uma solução para muitos problemas e oferece inúmeras vantagens em relação à utilização convencional de materiais virgens, como a conservação de agregados, ligantes e de energia, a preservação do meio ambiente e a restauração das condições geométricas existentes da pista de rolamento (DNIT, 2006).

As técnicas de conservação e reabilitação podem ser aplicadas a nível funcional (superficial) e/ou estrutural, dependendo do estado do pavimento. A recuperação funcional atua nas camadas betuminosas, no caso apenas na camada de desgaste. Onde as soluções mais freqüentes são a aplicação de uma fina camada de mistura betuminosa a quente sob a superfície existente, fresar e substituir as camadas betuminosas degradadas por materiais betuminosos novos modificados, reciclagem das camadas betuminosas em central ou no local. A recuperação estrutural consiste na intervenção nas camadas granulares e/ou betuminosas. As soluções mais freqüentes são reconstrução do pavimento, removendo as camadas degradadas e aplicando novos materiais em novas camadas, construção de camadas betuminosas adicionais sob a superfície do pavimento, reciclagem profunda que engloba as camadas betuminosas e camadas granulares, obtendo uma camada homogênea estabilizada com ligantes hidráulicos e/ou betuminosos. O processo pode ser realizado em central ou, mais comum, no local.

Esta técnica aplica-se essencialmente na reabilitação de pavimentos flexíveis em estado de ruína com bases granulares, e pavimentos betuminosos num estado último de utilização. Na maioria dos casos, esta técnica mostra-se uma alternativa muito vantajosa

em termos financeiros ao reforço convencional ou à reconstrução dos pavimentos (FONSECA, S.D. 2008).

Os tipos de reciclagem podem ser distinguidos pelo local (usina ou no local da obra) de produção da mistura, temperatura (a quente ou a frio) que a mistura é produzida, pelas características do material a reciclar e pelo tipo de asfalto utilizado. A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming – ARRA), define cinco categorias principais para os diferentes métodos de reciclagem: reciclagem a frio, a quente, a frio in situ, a quente in situ e profunda.

A reciclagem feita no local (in situ) apresenta vantagens sobre as técnicas de reciclagem em centrais. Dentre elas pode-se resaltar o menor custo (uma vez que não é necessário realizar o transporte do material para uma central), redução do consumo energético e o menor desgaste das estradas existentes (uma vez que não são necessários os transportes entre o material e a usina) (FONSECA, 2007).

2.6.1 Reciclagem de pavimento a frio

O processo de reciclagem a frio envolve a remoção de toda a estrutura do pavimento, ou parte dela, com redução do material a dimensões apropriadas para depois ser misturada a frio, na construção de uma nova camada, onde poderão ser adicionados materiais betuminosos (emulsão asfáltica), agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos. A mistura final poderá ser utilizada como camada de base, porém esta camada deverá ser revestida com um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica antes de ser submetida à ação direta do tráfego (DNIT, 2006).

2.6.2 Reciclagem de pavimento a quente

A reciclagem a quente de pavimentos é um processo em que parte ou toda a estrutura do pavimento é removida e reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturada a quente no próprio local (in-situ) ou em usina estacionária. O processo pode incluir a adição de novos agregados, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor. O produto final deve atender às especificações de misturas asfálticas a quente destinadas às camadas de base, de ligação ou de rolamento (DNIT, 2006).

2.6.3 Reciclagem de pavimento profunda

Esta técnica consiste na obtenção de uma nova camada de base ou sub-base estabilizada, através da adição de um novo material geralmente inserido no material fresado. Esses materiais podem ser: cal hidratada, cimento, agregados (miúdo e/ou gráudo), emulsões, agentes químicos (por exemplo, polímeros e fibras sintéticas), etc. Estes aditivos têm por finalidade dotar o pavimento velho de características físicas apropriadas a um pavimento novo (ARAÚJO, 2001).

2.7 Reutilização de resíduos em camadas de base e/ou sub-base

Com base na tecnologia existente, a utilização de resíduos da construção civil tem-se mostrado uma alternativa viável na execução de camadas do pavimento. Várias cidades do Brasil (São Paulo, Belo Horizonte, Ribeirão Preto, entre outras) e no exterior têm utilizado agregados reciclados na execução de pavimentos. Os resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação desse material para uso em pavimentos rodoviários (CARNEIRO, 2008).

O reaproveitamento do fresado, para base e/ou sub-base rodoviária, a intenção é de se utilizar o material nas características em que se encontra no momento, incorporando-se ao cascalho ou outro material de base, com ou sem a adição de cimento, cal, betume, etc. (ARAÚJO, 2004).

ARAÚJO E FARIAS (2004), analisaram amostras de material fresado, retiradas de alguns trechos de vias do Distrito Federal (DF). No estudo realizado verificou-se que a incorporação do fresado ao cascalho de base fez com que a mistura se enquadrasse na faixa granulométrica especificada devido ao material fresado apresentar uma parcela muito pequena de finos. O estudo mostrou também que o fresado pode ser caracterizado como um material não plástico, neste caso, e que este material tende a aumentar a massa específica das misturas e diminuir a umidade ótima de compactação. Além disso, os autores observaram que com a incorporação do material fresado, ocorreu uma queda considerável no valor de ISC (Índice de Suporte Califórnia) devido ao fato de que a presença do betume tende a diminuir o ângulo de atrito entre as partículas do material

fresado e conseqüentemente, o valor de ISC. Salientam os autores que isto ocorre nas misturas, principalmente, para maiores teores de fresado. E que todos estes fatos indicam a existência de uma percentagem ótima de fresado a ser incorporada, pois nas misturas com porcentagens entre 20% e 25%, apresentaram um ganho de resistência e porcentagens, acima destas citadas, houve uma pequena redução da resistência.

Estudos realizados com a incorporação de resíduos em camadas de base e sub-base de pavimentos apresentam resultados satisfatórios. Enquadram-se nessa categoria os resíduos de fresagem, corroborando assim a viabilidade técnica da utilização destes materiais após o processo de reciclagem dos pavimentos.

2.8 Ganhos ambientais com a reutilização e reciclagem do material fresado

A construção civil é um dos principais geradores de resíduos em grande escala. Esta produção de resíduos está diretamente relacionada à geração de impactos ambientais, devido a todas as etapas do processo de construção ocorre de certa forma um grande prejuízo ao meio ambiente.

Em relação à etapa de restauração de uma rodovia tem-se contribuído bastante para o aumento de impactos ambientais no mundo, devido à geração e destinação de forma inadequada do material deteriorado.

Segundo o DNIT (2006) a reutilização do material fresado em camadas de pavimentos e a reciclagem do mesmo apresenta-se como uma solução para muitos problemas e oferece inúmeros ganhos em relação à utilização de materiais virgens e a geração de impactos ambientais como:

- Conservação de agregados, de ligantes e de energia, ou seja, a reutilização dos agregados do pavimento degradado propicia uma redução na demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte, prolongando o tempo de exploração das ocorrências existentes, além disso, o ligante remanescente pode ter suas propriedades restabelecidas pela adição de asfalto novo ou agente rejuvenescedor. O consumo de energia também pode ser favorecido através de sua redução durante a usinagem da mistura;

- Preservação do meio ambiente, ou seja, evitar a exploração excessiva de jazidas minerais (caixas de empréstimos), evitando assim o acúmulo e/ou geração do passivo ambiental;
- Conservação das condições geométricas existentes, ou seja, a adoção das técnicas de reciclagem permite que as condições geométricas da pista sejam mantidas ou modificadas facilmente, evitando-se problemas, como por exemplo, as alturas em túneis (gabarito vertical) e o acréscimo de carga permanente em pontes e viadutos;
- a eliminação dos depósitos em aterro dos materiais retirados do pavimento e diminuição da extração de agregados das pedreiras existentes com todas as vantagens ambientais daí resultantes;

Com a utilização dessas técnicas de reutilização e reciclagem faz com que diminua de forma expressiva os impactos ambientais causadas por esses resíduos e com isso melhorado a qualidade de vida das futuras gerações e proporcionando sustentabilidade.

3 Materiais e métodos utilizados

3.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa são: solo de jazida e material fresado. A seguir, serão descritos os materiais, a origem e os critérios de escolha de cada um.

3.1.1 Solo de jazida

Foi coletado um solo de jazida proveniente da Jazida J-05, mostrado na figura 3.1, localizada no distrito de São Rafael KM 24 BR-104 caruaru-PE, da obra de restauração e duplicação da BR-104/PE, no estado de Pernambuco. As amostras de solo jazida foram coletadas à profundidade de 1,5m, como forma de evitar a camada superficial.



Figura 3.1 Solo jazida puro utilizado no estudo

3.1.2 Material Fresado

O material fresado utilizado na pesquisa foi coletado a partir dos trabalhos de fresagem da restauração da pista existente da BR-104/PE. As operações de fresagem que produziram o material em estudo foram realizadas a frio pela máquina W 1900 da marca Wirtgen. No entanto, os serviços de fresagem realizados no pavimento da BR-104/PE atingem a totalidade da camada de revestimento asfáltico. Assim, as profundidades variam entre 5 a 10 cm. Esse Material foi estocado na usina, localizada próxima a Caruaru conforme a figura 3.2, e será utilizado para um estudo de viabilidade em relação à mistura do mesmo com o solo de jazida utilizado nas camadas de sub-base da via duplicada.



Figura 3.2 Material fresado da BR-104

3.2 Métodos

3.2.1 Coleta de materiais

Primeiramente foi definido a quantidade e o local para a coleta do solo jazida puro, onde será coletado na jazida J-05, Em que a quantidade depende das amostras dos ensaios que vão ser utilizado nesse estudo. O material fresado da BR-104 é estocado na usina, onde foi feito a coleta das amostras de forma criteriosa para que se tenha a mesma procedência, onde quantidade também depende das amostras utilizadas nos ensaios.

3.2.2 Avaliação das propriedades físicas dos materiais

Nesta etapa, as amostras do solo foram secas ao ar, destorroadas e acondicionadas em sacos plásticos no canteiro de obra até o momento de serem utilizadas. A preparação das amostras de solo para os ensaios de caracterização física foi realizada de acordo com a DNER-ME041-94. As normas adotadas para os ensaios de caracterização física das amostras de solo são: análise granulométrica por peneiramento DNER-ME080-94, determinação da massa específica dos sólidos do solo ABNT-NBR 65085/84, determinação do limite de plasticidade DNER-ME082-94, determinação do limite de liquidez DNER-ME122-94.

O material fresado utilizado foi acondicionado e tambor apropriado até o momento de sua utilização. As normas adotadas para os ensaios de caracterização física das amostras de material fresado são: análise granulométrica por peneiramento DNIT-ME0 083/98, determinação da massa específica dos sólidos do solo NBR 65085/84.

A seguir serão relatados os ensaios realizados de acordo com as normas específicas no laboratório do consorcio Delta/ Galvão/ Queiroz Galvão (DC/GE/QG) responsável pela execução da BR-104 trecho Caruaru - Santa Cruz do Capibaribe, que serviram para a caracterização das propriedades físicas dos materiais estudados.

3.2.2.1 Preparação de amostras para ensaios de caracterização

Os procedimentos para a preparação de amostras de solo para ensaios de caracterização obedecem à norma DNER-ME041-94 – Preparação de amostras para ensaios de caracterização.

3.2.2.2 Análise granulométrica

Através do ensaio de granulometria por peneiramento, normatizado pela norma DNER-ME080-94 e DNIT-ME 083/98, é determinada a distribuição granulométrica do solo de jazida e material fresado respectivamente. Conforme a norma, para a realização dessa análise, uma amostra de cada material estudado foi separada e submetida ao peneiramento em uma série-padrão de peneiras, cuja abertura de malhas tem a sequência definida na ABNT EB-22 (ABNT, 1988).

3.2.2.3 Limites de consistência (limite de liquidez e plasticidade)

O limite de liquidez e de plasticidade, foram determinados para as amostras de solo jazida de acordo com a norma da DNER- ME122-94 e DNER- ME082-94, respectivamente.

3.2.3 Avaliação das propriedades mecânicas

Os ensaios realizados para a caracterização mecânica do solo de jazida puro e das misturas de solo de jazida com material fresado foram: índice de suporte Califórnia (California Bearing Ratio, CBR), compactação e resistência à compressão do solo.

A seguir serão relatados os ensaios realizados de acordo com as normas específicas no laboratório do consorcio Delta/ Galvão/ Queiroz Galvão (DC/GE/QG) responsável pela execução da BR-104 trecho Caruaru - Santa Cruz do Capibaribe , que serão responsáveis para avaliar as propriedades e capacidades mecânicas do solo de jazida puro e solo composto pela mistura solo de jazida com material fresado.

3.2.3.1 Ensaios de compactação

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma DNER-ME129-94. Inicialmente, o ensaio de compactação foi realizado para as amostras de solo de jazida puro. Em seguida, para amostras de 70 % solo jazida + 30% de material fresado e para amostras de 50% solo jazida + 50% de material fresado.

3.2.3.2 Ensaios de índice de suporte Califórnia, (ISC) - (California Bearing Ratio , CBR) – (amostras deformadas não trabalhadas)

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma DNER-ME049-94. Esse ensaio determina o valor relativo do suporte de solos. O ensaio do CBR foi realizado para a amostra de solo jazida puro. Em seguida, para amostra de 70 % solo jazida + 30% de material fresado e para amostra de 50% solo jazida + 50% de material fresado.

O valor de ISC exprime uma porcentagem de resistência à penetração de dado material, tido como valor de referência o resultado de materiais britados e bem graduados (valor padrão de 100%).

3.2.3.3 Ensaios de resistência à compressão simples

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma DNER-ME180-94. Inicialmente, o ensaio de compactação foi realizado para a amostra de solo jazida puro. Em seguida, para amostra de 70% solo jazida + 30% de material fresado e para amostra de 50% solo jazida + 50% de material fresado.

3.2.4 calculo do coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc) e a classificação dos materiais estudados segundo os mesmo.

O coeficiente de uniformidade (Cu) e obtido através da equação:

$$Cu = D_{60} / D_{10}$$

Onde: D60 corresponde a 60 % que passa na peneira

D10 corresponde a 10 % que passa na peneira

D30 corresponde a 30 % que passa na peneira

Este parâmetro fornece a inclinação média da curva granulométrica.

O coeficiente de curvatura (Cc) é obtido através da equação:

$$C_u = D_{30}^2 / D_{10} \times D_{60}$$

Este parâmetro fornece uma idéia da forma e simetria da curva granulométrica.

A classificação dos materiais segundo os coeficientes, segundo a tabela 3.1:

Coeficiente de uniformidade (Cu)	
solo uniforme	$CU < 5$
solo mediantemente uniforme	$5 < CU < 15$
solo desuniforme	$CU > 15$
Coeficiente de curvatura (Cc)	
Bem graduada	$1 \leq CC \leq 3$

Tabela 3.1 - A classificação dos materiais segundo os coeficientes

3.2.5 Classificação do solo segundo a TRB (*Transportation Research Board*)

Nesta classificação, os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Na figura 3.3 a seguir é mostrado o quadro de classificação dos solos segundo o TBR. Determina-se o grupo do solo, por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do ensaio coincidir, será classificação correta (DNIT, 2006).

Classificação dos solos (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD) - TRB											
Classificação geral	Materiais granulares 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							Materiais silto-argilosos mais de 35% passando na peneira nº 200			
Classificação em grupos	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
											A - 7 - 5
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A - 7 - 6
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 max										
Nº 40	30 max	30 max	51 min								
Nº200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Características da fração passando na peneira Nº40											
Límite de liquidez				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
limite de plasticidade	6 max	6 max	NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	10 min	10 min
índice de grupo	0	0	0	0	0	4 max	4 max	8 max	12 max	16 max	20 max
Materiais constituintes	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areia silto-argilosa ou argilosa				Solos siltosos		Solos argilosos	
comportamento como subleito / sub-base	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Figura 3.3 classificação do solo segundo TRB

4 Resultados e discussões

4.1 Propriedades físicas

4.1.1 Composição granulométrica do solo jazida puro e do material fresado

A distribuição dos tamanhos dos grãos do solo jazida e do material fresado foram obtidas através dos ensaios de granulométricos por peneiramento, segundo a norma DNER-ME080-94 e DNIT-ME 083/98 respectivamente. Com as amostras de solo jazida puro e de material fresado, separadas e submetidas ao peneiramento manual da série-padrão de peneiras. Os resultados destes ensaios são apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2, enquanto as curvas granulométricas das amostras encontram-se na figura 4.1.

Peneiramento		Peso retido	Retida	Retida acumulada	Percentagem assante
Nº	mm	g	%	%	%
2pol	50	0	0	0	100
1,5pol	38	0	0	0	100
1pol	25	0	0	0	100
3/4pol	19	0	0	0	100
3/8pol	9,5	0	0	0	100
nº4	4,8	40	2	2	98
nº10	2	100	5	7	93
nº16	1,2	140	7	14	86
nº30	0,6	180	9	23	77
nº40	0,42	240	12	35	65
nº50	0,3	340	17	52	48
nº100	0,15	660	33	85	15
nº200	0,075	140	7	92	8
Fundo		160	8	100	
Total		2000	100		

Tabela 4.1 Resultados do ensaio granulométrico do solo virgem

Peneiramento		Peso retido	Retida	Retida acumulada	Percentagem passante
Nº	mm	g	%	%	%
2pol	50	0	0	0	100
1,5pol	38	0	0	0	100
1pol	25	60	3	3	97
3/4pol	19	140	7	10	90
3/8pol	9,5	360	18	28	72
nº4	4,8	520	26	54	46
nº10	2	360	18	72	28
nº16	1,2	220	11	83	17
nº30	0,6	160	8	91	9
nº40	0,42	40	2	93	7
nº50	0,3	40	2	95	5
nº100	0,15	80	4	99	1
nº200	0,075	20	1	100	0
Fundo		0	0	100	
Total		2000	100		

Tabela 4.2 Resultados do ensaio granulométrico do material fresado

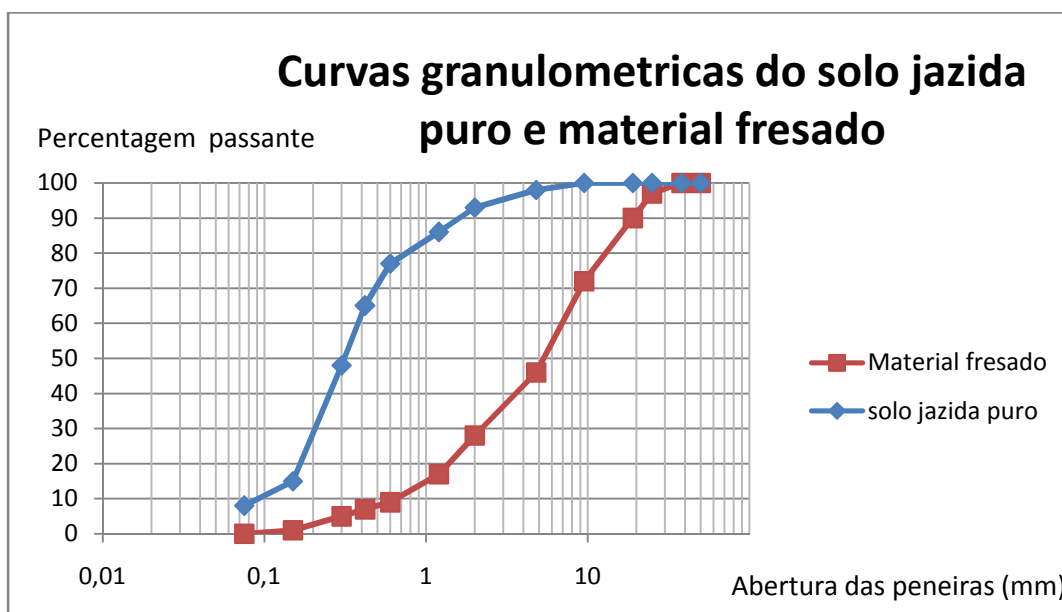


Figura 4.1 Gráfico das distribuições granulométricas do solo jazida e material fresado

Com base nas tabelas 4.1 e 4.2 e na figura 4.1 pode-se observar que o material solo jazida puro apresenta mais finos que o material fresado. Essa distribuição granulométrica mais grossa do material fresado ocorre devido a uma aglutinação de partículas menores provocadas pelo ligante asfáltico.

Através do gráfico da distribuição granulométrica do solo jazida puro e do material fresado podemos obter os valores dos diâmetros efetivos e posteriormente os valores do coeficiente de uniformidade (C_u) e do coeficiente de curvatura (C_c) conforme a tabela 3.1 dos materiais estudados, que indicam a distribuição das partículas do solo, mostrados da tabela 4.3.

Dados	Solo jazida puro	Material fresado
D10 (mm)	0,09	0,69
D30 (mm)	2,21	2,3
D60 (mm)	0,39	7
Coeficiente de uniformidade (C_u)	4,4	10,2
Coeficiente de curvatura (C_c)	1,3	1,1
Massa específica real (g/cm^3)	2,75	2,43

Tabela 4.3 valores obtidos através do gráfico de distribuição granulométrica do solo jazida puro e do material fresado

De acordo com os valores dos coeficientes obtidos, o solo jazida puro é caracterizado como um solo uniforme e bem graduado e o material fresado como mediamente uniforme e bem graduado.

Segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006) os materiais para bases granulares devem ser enquadrados numa das seguintes faixas granulométricas, mostrados da figura 4.2:

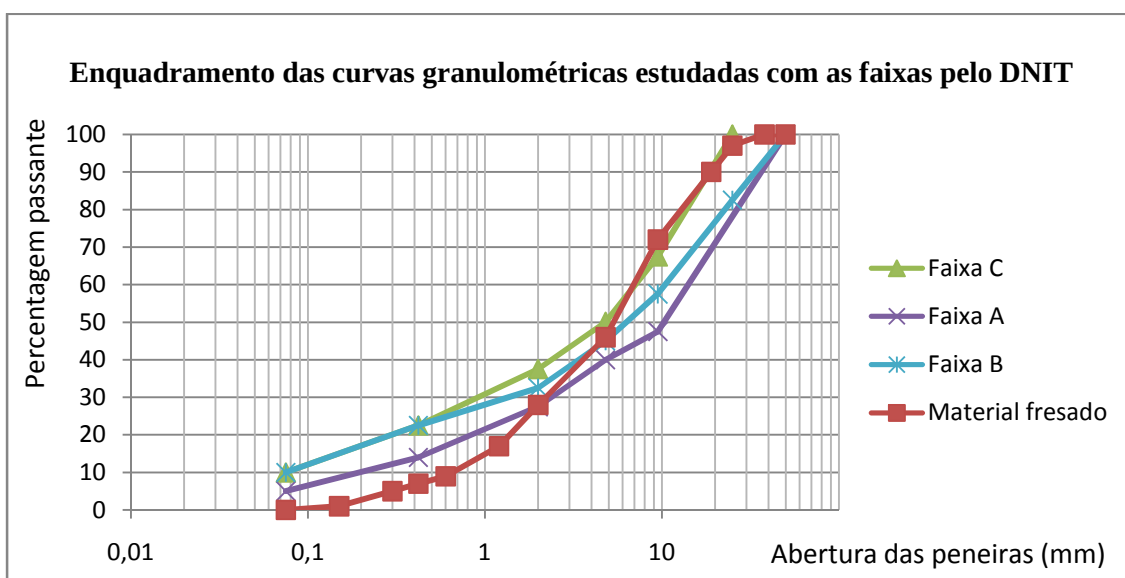


Figura 4.2 Faixas granulométricas que devem se enquadrar os matérias constituintes de bases granulares, segundo o manual do DNIT, 2006.

Observa-se na figura 4.2 que a curva do material asfáltico se assemelham as faixas propostas pelo DNIT. Onde ocorreu uma redução da quantidade de finos do material fresado em relação às faixas granulométricas A,B e C do manual do DNIT evidenciado nas peneiras nº 30, 40, 50, 100 e 200 que apresentaram valores abaixo do limite estabelecidos nas faixas A, B e C para as referidas peneiras. Está redução da quantidade de material fino ocorreu provavelmente devido aglomeração das partículas de agregado causado por a presença de ligante asfáltico, ocasionando a formação de grumos e acarretando, assim, o aumento da granulometria do material fresado.

4.1.2 Determinação dos índices físicos do solo jazida

4.1.2.1 Limite de liquidez do solo jazida

Os ensaios foram realizados segundo as normas da DNER- ME122-94 para limite de liquidez. Os resultados são apresentados na tabela 4.4 e na figura 4.3.

Limite de liquidez	
Nº de golpes	teor de umidade
6	29,2
15	27,3
27	24,9
20	24,7
30	23,8

Tabela 4.4 Dados experimentais para a reta do gráfico do limite de liquidez do solo jazida

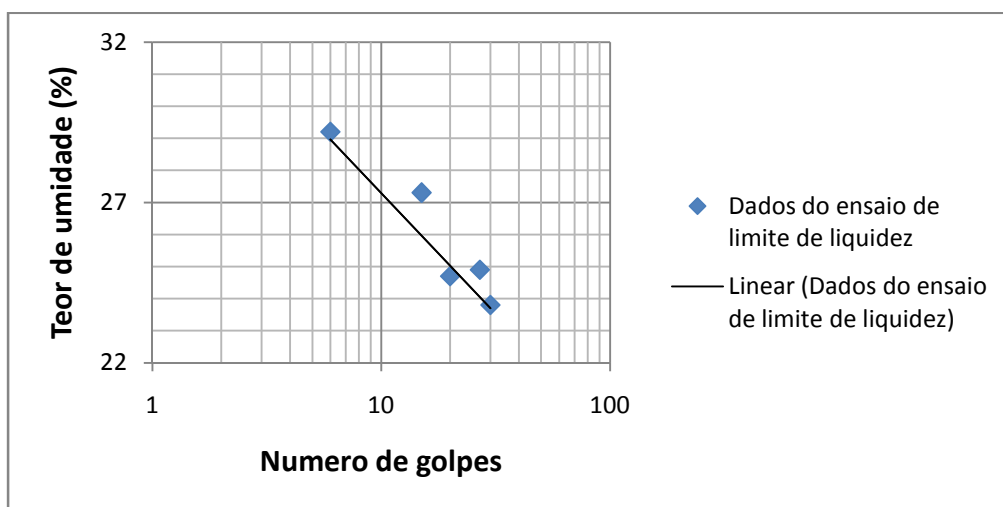


Figura 4.3 Gráfico do limite de liquidez

Portanto, conforme a norma NBR-6954/94, observa-se no gráfico da figura 4.3 que para 25 golpes, o limite de liquidez é de 24,5%.

4.1.2.2 Limite de plasticidade do solo jazida

Os ensaios foram realizados segundo as normas da DNER- ME082-94 para limite de plasticidade. Os resultados são apresentados na tabela 4.5.

Limite de plasticidade				
amostra 1	amostra 2	amostra 3	amostra 4	amostra 5
20,9	21,3	22,4	21,6	19,7
Media				
21,18				

Tabela 4.5 Limite de plasticidade

4.1.2.3 Índice de plasticidade

O índice de plasticidade e obtido através de:

Índice de plasticidade (IP) = Limite de liquidez (LL) – limite de plasticidade(LP)

O índice de plasticidade (IP) do solo jazida puro obtido no estudo foi de 3,32.

Com os resultados da distribuição granulométrica das partículas e dos limites de consistência, o solo foi classificado como A – 2 – 4, de acordo com o sistema de classificação TRB (*Transportation Research Board*) conforme a figura 3.1.

Segundo o sistema TBR, usualmente utilizado na classificação dos materiais a serem empregados em aterros, subleitos, sub-bases e bases de rodovias, o solo analisado possui uma excelente qualidade para construção das camadas do pavimento, tendo em vista se tratar de um solo predominantemente arenoso com pouca presença de finos (silte/argila).

4.2 Propriedades mecânicas

4.2.1 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram executados utilizando a Energia Proctor Intermediário visando à utilização do material nas camadas de base e sub-base do pavimento, conforme o Método de ensaio da norma DNER-ME129-94. A mistura, depois de homogeneizada, foi fracionada em cinco partes iguais onde foram adicionadas diferentes quantidades de água.

Na figura 4.4 são apresentados os resultados obtidos com a realização do ensaio de compactação para amostra de solo jazida puro, 75% solo jazida + 25% material fresado e 50% solo jazida + 50% material fresado.

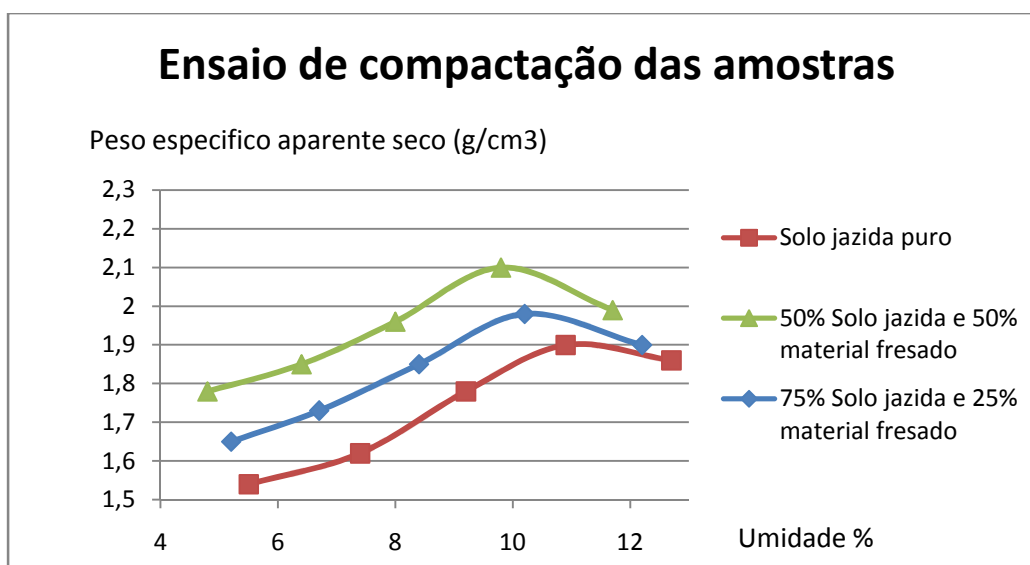


Figura 4.4 Gráfico do ensaio de compactação (Peso específico aparente seco x umidade)

O valor do peso específico máximo obtidos foram 1,9 g/cm³, 1,98 g/cm³ e 2,1 g/cm³, respectivamente. Como esperado a mistura de 50% de solo puro + 50% de material fresado obteve o maior peso específico.

O valor da umidade ótima é obtido através do maior valor do peso específico aparente seco no ensaio de cada amostra. Os valores das umidades ótimas das amostras (solo jazida puro, 75% solo jazida + 25% material fresado e 50% solo jazida + 50% material fresado), são 10,2 , 9,7 e 8,9 , respectivamente.

Esses valores indicam que os solos serão compactados de forma a obterem a sua densidade máxima, ou seja, terão sua resistência aumentada.

4.2.2 Ensaio do CBR

Os resultados obtidos com os ensaios de CBR, conforme a norma DNER-ME049-94, para o solo puro e para o solo com adições de material fresado nas proporções de 25% e 50%, em massa, em relação à massa total da amostra são apresentados na tabela 4.6 e na figura 4.5.

Teor de material fresado (%)	Media dos valores de CBR (%)	Expansão (%)
0	15,02	0,25
25	19,85	0,06
50	28	0,05

Tabela 4.6 Resultados dos ensaios de CBR com a variação do material fresado na mistura

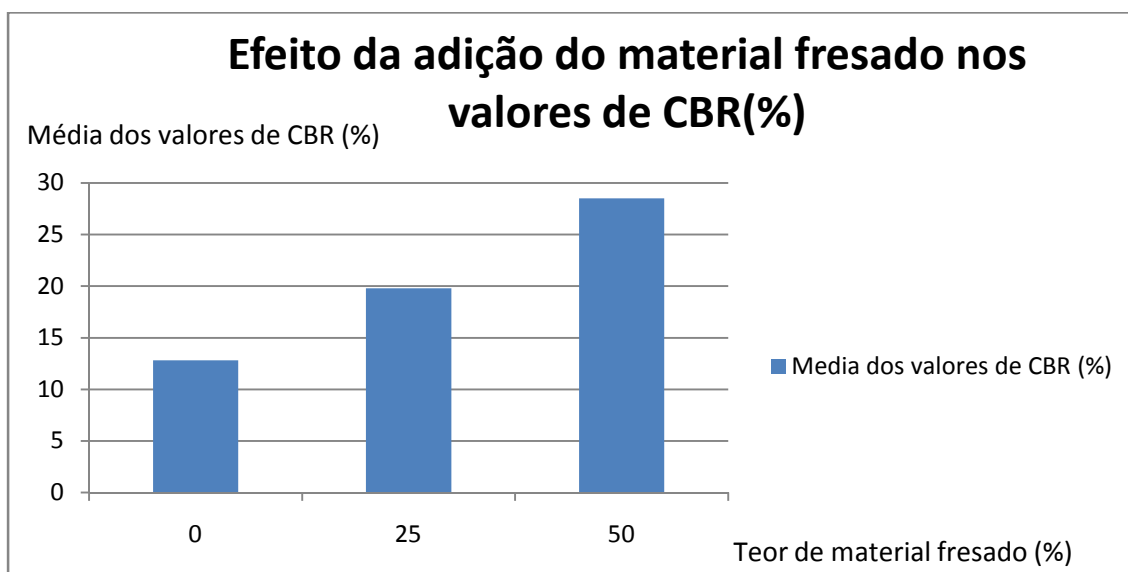


Figura 4.5 - Efeito da adição do Material Fresado nos valores de CBR

Analisando os resultados apresentados na figura 4.5, observa-se que houve variações significativas nos valores obtidos para o CBR, que apresentaram um aumento de resistência proporcional à quantidade de material fresado adicionado à mistura. Esse aumento do CBR foi de 32,2% na adição de 25% de fresado na mistura, em relação ao solo puro e de 86,4% na adição de 50% de fresado na mistura, em relação ao solo puro.

Na restauração da BR-104 onde foi obtido o material fresado estudado possuía uma camada de revestimento de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente). Onde a sua composição foi feita de agregados minerais britados, de material fino e do CAP (cimento asfáltico petróleo). Na mistura com o solo jazida a associação de materiais britados e o CAP com o solo jazida fez com que aumentasse a resistência da mistura de forma proporcional à porcentagem de material fresado adicionado na mistura, como foi apresentado no ensaio do CBR.

Segundo o DNIT e DER para que o material possa ser utilizado com camada de sub-base o CBR tem que ser maior ou igual a 20%. Com isso a adição do percentual de 25% de material fresado, obteve-se um CBR igual a 19,85%, não possibilitaria a execução de uma camada de sub-base estabilizada granulometricamente. Com a adição do percentual de 50% de material fresado, obteve-se um CBR igual a 28%, consequentemente possibilitaria a execução de uma camada de sub-base estabilizada granulometricamente com essa mistura. Já em relação à expansão o DNIT e o DER diz

que a expansão máxima é de 1%. Com isso todas as amostras estudadas atenderam a essa exigência.

De acordo com a pesquisa é possível e viável a utilização da mistura 50% solo jazida e 50% material fresado na composição da sub-base da duplicação e restauração da BR-104 PE.

4.2.3 Ensaio de resistência a compressão simples

As amostras de solo jazida puro, mistura (75% solo jazida + 25% material fresado), mistura (50% solo jazida + 50% material fresado) foram submetidas a ensaios de resistência a compressão simples de acordo com a norma DNER-ME180-94 a fim de obter os valores de resistência do solo jazida puro e sua variação quando submetido a misturas com diferentes teores de material fresado mostrados na tabela 4.7 e na figura 4.6.

% de material fresado na mistura	Resistência a compressão simples (Mpa)
0	0,67
25	0,85
50	1,23

Tabela 4.7 Resultados dos ensaios de resistência a compressão simples com a variação do material fresado na mistura

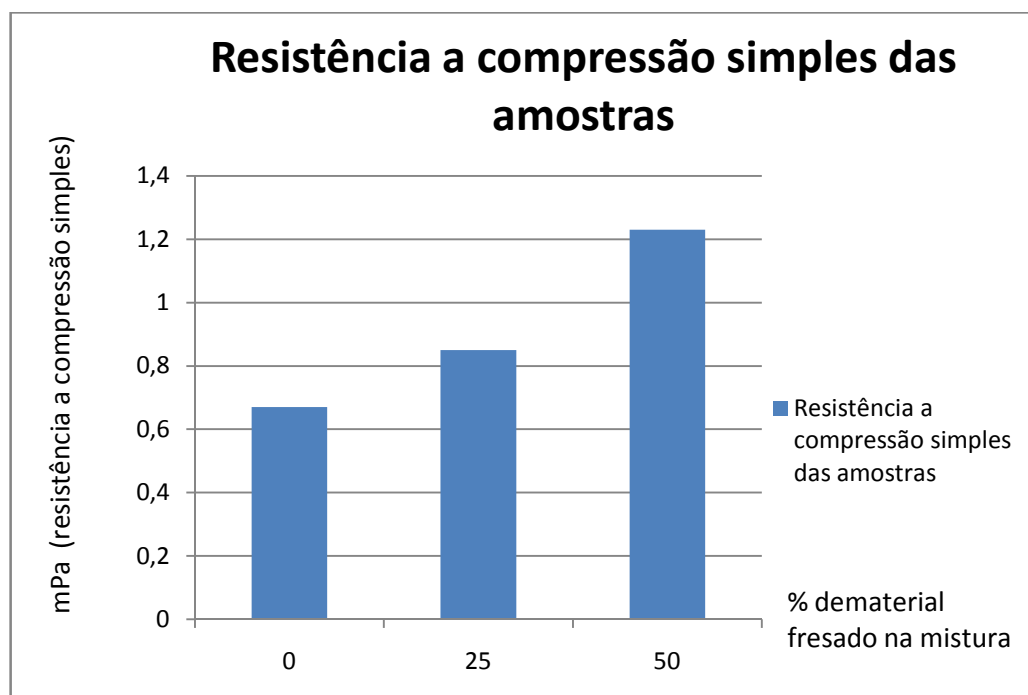


Figura 4.6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples das amostras

Houve um aumento da resistência a compressão simples de 26,86% na adição de 25% de fresado na mistura, em relação ao solo puro e de 83,58% na adição de 50% de fresado na mistura, em relação ao solo puro.

Segundo BAPTISTA (1976), os valores mínimos de resistência à compressão simples recomendados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas, são de 0,35 MPa para sub-base e 0,70 MPa para bases.

A associação de materiais britados e o CAP com o solo jazida fez com que aumentasse a resistência da mistura de forma proporcional à porcentagem de material fresado adicionado na mistura, como foi apresentado no ensaio de resistência a compressão simples.

Conforme os dados apresentados na tabela 4.6, os valor obtido no ensaio de compressão simples do solo jazida puro restringiriam o uso do material apenas à execução de sub-bases e os das misturas podem ser utilizadas na composição de sub-base e de base. As misturas obtiveram resultados satisfatórios em relação à resistência a compressão simples.

5 Conclusão

O estudo desenvolvido avaliou os resultados das misturas de solo jazida puro com duas proporções de material fresado distintos para a possibilidade de aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, de maneira a utilizar uma alternativa técnica, econômica e ecologicamente correta proporcionando uma destinação final dos resíduos de fresagem de pavimentos asfálticos gerados através da manutenção e restauração de rodovias.

Foi observado através dos ensaios físicos a composição granulometria e a determinação dos índices físicos dos materiais envolvidos nas misturas. Os valores encontrados nos mesmos constataram que o solo jazida puro é caracterizado como um solo uniforme e bem graduado e o material fresado como mediantemente uniforme em bem graduado. Através da distribuição granulométrica e dos índices físicos podemos classificar o material segundo a TRB (*Transportation Research Board*) como de excelente qualidade para a construção de camadas do pavimento.

A adição de material fresado proporcionou o aumento significativo de resistência em relação ao solo jazida puro, onde a mistura (50% solo jazida + 50% material fresado) atingiu um valor de CBR de 28%. Esse valor é compatível com as especificações do DNIT que diz que os materiais granulares utilizados na composição das camadas de sub-base de pavimentos rodoviários tem que possuir um $CBR \geq 20\%$.

Os valores encontrados nos ensaios de compressão simples para as misturas com material fresado estudadas foram satisfatórios, com resultados superiores aos recomendados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Texas (DOT-Texas, U.E. A), que preconizam uma resistência mínima à compressão simples de 0,35 MPa para materiais de sub-base e de 0,7 MPa para materiais de base.

Através de uma análise final podemos afirmar que a reutilização do material fresado oriundo da obra de duplicação e restauração da BR-104 em mistura com um solo jazida puro na proporção de 50% solo jazida + 50% material fresado atende os

requisitos e especificações físicos e mecânicos do DNIT para utilização desse material como camada de sub-base de pavimentos rodoviários.

6 Sugestões para trabalhos futuros

A pesquisa realizada utilizando o material fresado gerado nas atividades de manutenção e restauração rodoviária, deve ser vista como um estudo inicial para outras pesquisas que envolvam o aperfeiçoamento das atividades propostas.

Sugere-se:

- Fazer ensaios com teores entre 30% e 50% de material fresado na mistura com solo jazida puro, já que o estudo feito nessa pesquisa com 25% ficou muito próximo das especificações adequadas para uso em camadas de sub-base de pavimentos rodoviários;
- Realizar ensaios com adições de diferentes porcentagens de aglomerantes como cal e cimento na mistura para possível aumento de resistência e uso em bases de pavimentos rodoviários;
- Executar e acompanhar o comportamento de um trecho experimental utilizando a mistura de solo jazida puro e material fresado com as proporções estudadas neste trabalho;
- Realizar o estudo do aproveitamento do material fresado em outros serviços dentro da construção de rodovias;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7207/82: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.
- ABNT, 1988, EB-22 - Determinação da peneiração. Associação Brasileira de Norma Técnica.
- ARAÚJO, L. M. D; FARIAS, M. M; JÚNIOR, F. M. V. Estudo de Propriedades Mecânicas de Material Fresado Visando Incorporação em Camadas de Base Rodoviária. Alabama, 2001.
- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica. Rio de Janeiro, 2007.
- BONFIM, V. Fresagem de pavimentos asfálticos. 3. Ed. São Paulo: Exceção, 2007.
- CARNEIRO, A. P; BURGOS, P. C; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos, 2008. Disponível em: <www.eccosystems.com.br/2008/artigos/reciclagem/6ProjetoParareciclagemdeentulhodemateriaisdeconstrucao>.
- CNT – Confederação Nacional dos Transportes – Pesquisa CNT de rodovias 2011. Disponível em <[http:// WWW.cnt.org.br/](http://WWW.cnt.org.br/)>.
- DER/SP - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO, ET-DE - P00/038, Fresagem de Pavimento Asfáltico, 2006.
- DNER, 1994, ME 041 – Preparação de amostras para ensaios de caracterização. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER, 1994, ME 080 – Análise granulométrica por peneiramento. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER, 1994, ME 082 – Determinação do limite de plasticidade. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER, 1994, ME 0122 – Determinação do limite de liquidez. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER, 1994, ME 0122 – Determinação do limite de liquidez. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

- DNER, 1994, ME 0129 – Ensaaios de compactação de amostras não trabalhadas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER, 1994, ME 049 – Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER, 1994, ME 0180 – Determinação de resistência a compressão simples. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNIT, (2006). Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. IPR, 3ª Ed. Rio de Janeiro.
- DNIT, (2011). Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT, (2006). Manual de restauração de Pavimentos. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- FONSECA, P. Engenharia e Pavimento, LTDA. 2009. Disponível em:
<http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem>
- FONSECA, P. (S.D). *Reciclagem de Pavimentos*. Obtido em 15 de Outubro de 2008. disponível em:
<http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>
- MOMM, L.; DOMINGUES, F. A. A. Reciclagem de Pavimentos à Frio "in situ", Superficial e Profunda. Reunião Anual de Pavimentação, 29ª, Cuiabá, 1995.
- MARQUES, G. L. O. Camadas de pavimentos flexíveis. 2007.
- WIRTGEN. (2008). *Manual de Reciclagem a Frio* (2ª ed.).
- SENÇO, W. (2007). Manual de Técnicas de Pavimentação Vol. 1 – 2. ed. ampl - PINI - SP.
- PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA (2008). Formação básica para engenheiros, Rio de Janeiro 2008.