



**CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS**

*Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 3.607, de 17/10/05, D.O.U. nº 202, de 20/10/2005*  
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

**RENNEBRI LEANDRO DA SILVA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA ADIÇÃO DE MATERIAL FRESADO EM SOLO  
NATURAL DE BAIXA RESISTÊNCIA PARA BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO  
FLEXÍVEL.  
ESTUDO DE CASO: PARAÍSO DO TOCANTINS -TO**

**PALMAS - TO**

**2015**



**CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS**

*Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 3.607, de 17/10/05, D.O.U. nº 202, de 20/10/2005*  
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

**RENNEBRI LEANDRO DA SILVA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA ADIÇÃO DE MATERIAL FRESADO EM SOLO  
NATURAL DE BAIXA RESISTÊNCIA PARA BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO  
FLEXÍVEL.  
ESTUDO DE CASO: PARAÍSO DO TOCANTINS -TO**

Monografia apresentada como requisito parcial da disciplina Estágio em Engenharia Civil com TCC II do curso de Engenharia Civil, orientado pelo Professor Especialista Euzir Pinto Chagas.

**PALMAS – TO**

**2015**

RENNEBRI LEANDRO DA SILVA

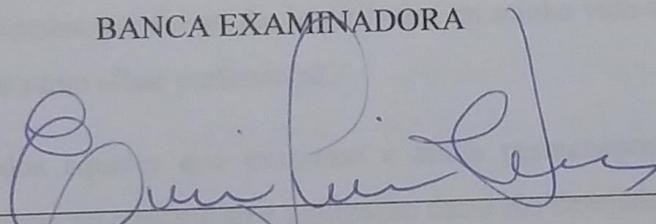
**VIABILIDADE TÉCNICA DA ADIÇÃO DE MATERIAL FRESADO EM SOLO  
NATURAL DE BAIXA RESISTÊNCIA PARA BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO  
FLEXÍVEL.**

**ESTUDO DE CASO: PARAÍSO DO TOCANTINS -TO**

Monografia apresentada como requisito parcial  
da disciplina Estágio em Engenharia Civil com  
TCC II do curso de Engenharia Civil, orientado  
pelo Professor Especialista Euzir Pinto Chagas.

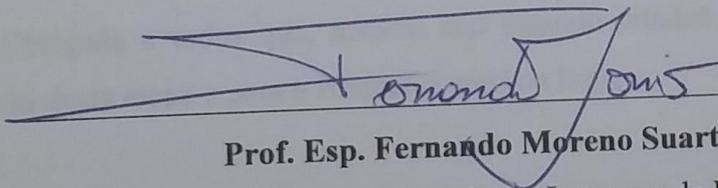
Aprovado em 14/11 de 15

BANCA EXAMINADORA



**Prof. Esp. Euzir Pinto Chagas.**

Centro Universitário Luterano de Palmas



**Prof. Esp. Fernando Moreno Suarte Júnior.**

Centro Universitário Luterano de Palmas

**Prof. M. Sc. Cezar Augusto Matos e Souza**

Centro Universitário Luterano de Palmas

PALMAS – TO

2015

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, o centro e o fundamento de tudo em minha vida, por renovar a cada momento a minha força e disposição e pelo discernimento concedido ao longo dessa jornada.

Agradeço a minha MÃE, Antônia Quixabeira da Silva Alves, que pela arte de amar incondicionalmente um ao outro soube-me educar e me transmitindo os mais valorosos saberes, compartilhando comigo cada vitória, cada derrota, momentos difíceis que passamos juntos e alegrias. O meu eterno agradecimento, AMO VOCÊ.

Ao meu orientador, prof. esp. Euzir Pinto Chagas, que acreditou em mim; que ouviu pacientemente as minhas considerações partilhando comigo as suas ideias, conhecimento e experiências e que sempre me motivou, por ser um profissional extremamente qualificado e pela forma humana que conduziu minha orientação.

Aos docentes do curso de Engenharia Civil, pela convivência harmoniosa, pelas trocas de conhecimento e experiências que foram tão importantes na minha vida acadêmica/pessoal. E contribuíram para o meu novo olhar profissional.

Aos amigos e todos aqueles que cruzaram e ainda permanecem em minha vida, participando de alguma forma na construção e realização deste tão desejado sonho de carregar o canudo de minha formatura.

Obrigada a todos que, mesmo não estando citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa e para o Rennebri que sou hoje.

## RESUMO

DA SILVA, R. L. Viabilidade técnica da adição de material fresado em solo natural de baixa resistência para base e sub-base de pavimento flexível. Estudo de caso: Paraíso do Tocantins, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP/ULBRA.

O Brasil tem um grande desafio a ser concluído que é a interligação dos modais de transportes existentes de carga e passageiro, tal emprego ocasionaria benefícios econômicos e de qualidade para seu produto final. Sendo o modal rodoviário o mais abundante em território nacional, novas técnicas de construção e manutenção devem ser exploradas para garantir eficiência econômica e qualidade dos serviços executados. A estabilização granulométrica como mistura é uma técnica aplicada nas camadas que compõe a pavimentação flexível afim de misturar com outro material para garantir suas propriedades e suportar as cargas que a faixa de rodagem transmite ao solo. Na restauração de pavimentos, o serviço de fresagem que a compõe produz uma grande quantidade de material por meio de uma prática muito empregada que é a fresagem do revestimento asfáltico objetivo de estudo. O material normalmente é descartado em locais inapropriados e sem uso. Este trabalho apresenta uma solução para a reutilização do material fresado para estabilização granulométrica e adição em solos de baixa resistência, utilizando-se do método de reciclagem. Essa nova técnica visa minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte inapropriado do material fresado e economicamente traz benefícios pois a facilidade de encontrar jazidas com material adequado diminui. Ensaios feitos avaliaram as potencialidades e a viabilidade técnica da mistura com material asfáltico fresado em serviços de restauração na camada de base e sub-base do pavimento.

**Palavras-chave:** Material fresado. Base e Sub-base. Solo natural.

## ABSTRACT

DA SILVA, R. L. technical feasibility of adding the milled material low in natural soil resistance paragraph base and flexible pavement sub-base. Case Study: Paraíso do Tocantins, 2015. Work Completion of course in Civil Engineering, University Lutheran Center Palmas - CEULP / ULBRA.

Brazil has a great challenge to be completed that is the interconnection of existing transport modes of freight and passenger, such employment would result in economic benefits and quality for their end products. As the road transportation the most abundant in the country, new techniques of construction and maintenance should be explored to ensure economic efficiency and quality of services performed. The granulometric stabilization is a technique applied in layers that make up the flexible paving mix with other materials in order to ensure their property and handle the loads that the scroll track transmits to the ground. The pavement restoration generates a large amount of granular material through a much used practice that is the milling of the asphalt coating. The material is usually discarded in inappropriate places and unused. This paper presents a solution to reuse the milled material this particle size stabilization, and added in low resistance soils, using the recycling method. This new technique aims to minimize the environmental impacts caused by inappropriate disposal of milled material and economically beneficial because the need to find deposits with suitable material decrease. Tests made evaluated the potential and technical feasibility of mixing with milled asphalt material originated in catering services in the base layer and sub-base pavement.

**Keywords:** Machined material. Base and Sub-base. Natural soil.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

IMAGEM 1: COLETA DO MATERIAL FRESADO.....	38
IMAGEM 2: LEITURA DAS DEFORMAÇÕES DO SOLO .....	42
IMAGEM 3: PESAGEM DO MATERIAL RETIDO EM CADA PENEIRA.....	43
IMAGEM 4: ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ .....	45
IMAGEM 5: AMOSTRAS SEPARADAS PARA SECAGEM EM ESTUFA .....	46
FIGURA 1: CAMADAS CONSTITUINTES DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RODOVIÁRIOS .....	15
FIGURA 2: SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL .....	16
FIGURA 3: ILUSTRAÇÃO DO SISTEMA DE CAMADAS DE UM PAVIMENTO E TENSÕES SOLICITANTES .....	16
FIGURA 4: MÁQUINA FRESADORA.....	18
FIGURA 5: BENEFÍCIOS GERAIS DA TÉCNICA DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS .....	20
FIGURA 6: "COMBOIO" DE RECICLAGEM .....	21
FIGURA 7: ROTOR DE UMA MÁQUINA RECICLADORA.....	21
FIGURA 8: ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO RECICLADO "IN SITU" A FRIO COM CIMENTO .....	22
FIGURA 9: CONJUNTO RECICLADORA E MISTURADORA .....	23
FIGURA 10: ESQUEMA DE UMA MISTURADORA.....	23
FIGURA 11: "COMBOIO" COMPOSTO PELA MÁQUINA RECICLADORA, CISTERNAS PARA ÁGUA E EMULSÃO BETUMINOSA .....	25
FIGURA 12: ESQUEMA DE PRODUÇÃO DA MISTURA RECICLADA "IN SITU" COM EMULSÃO BETUMINOSA.....	25
FIGURA 13: ESQUEMA DE PRODUÇÃO DA MISTURA RECICLADA "IN SITU" A FRIO COM ESPUMA DE BETUME.....	27
FIGURA 14: RECICLAGEM "IN SITU" A FRIO COM ESPUMA DE BETUME.....	27
FIGURA 15: FASES DA RECICLAGEM A QUENTE "IN SITU".....	29
FIGURA 16: PRÉ-AQUECEDORES UTILIZADOS NA RECICLAGEM "IN SITU" A QUENTE .....	30
FIGURA 17: MISTURADOR .....	30
FIGURA 18: ESPALHAMENTO DA MISTURA .....	31
FIGURA 19: PENETRAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA .....	34
FIGURA 20: ILUSTRAÇÃO DA ANÁLISE POR PENEIRAMENTO .....	35
FIGURA 21: ESTADO DO TOCANTINS .....	37
FIGURA 22: MUNICÍPIO DE PARAÍSO DO TOCANTINS.....	37
FIGURA 23: LOCALIZAÇÃO DA JAZIDA DE SOLO LATERÍTICO.....	39
FIGURA 24: SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS .....	49

## LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

TABELA 1 - COMPOSIÇÕES DOS CORPOS-DE-PROVA .....	40
TABELA 2: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COM 100% DO SOLO NATURAL. ....	47
TABELA 3: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COM 80% DO SOLO NATURAL E 20% MF. ....	48
TABELA 4: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COM 60% DO SOLO NATURAL E 40% MF. ....	48
TABELA 5: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COM 30% DO SOLO NATURAL E 70% MF. ....	48
TABELA 6: TABELA DE GRADUAÇÕES GRANULOMÉTRICAS .....	50
TABELA 7: PESO ESPECÍFICO DAS AMOSTRAS .....	50
TABELA 8: RESULTADOS DO CBR / EXPANSÃO.....	51
TABELA 9: RESULTADOS DO LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE .....	52
GRÁFICO 1: GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COM 100 % DO SOLO NATURAL. ....	59
GRÁFICO 2: GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COM 80 % DO SOLO NATURAL E 20 % MF. ....	59
GRÁFICO 3: GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COM 60 % DO SOLO NATURAL E 40 % MF. ....	60
GRÁFICO 4: GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COM 30 % DO SOLO NATURAL E 70 % MF. ....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras;
CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas;
CP	Corpo-de-prova;
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte;
MF	Material Fresado;
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem;
ISC	Índice de Suporte Califórnia;
CBUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente.
%	Porcentagem;
m	Metro;
cm	Centímetro;
mm	Milímetro;
C°	Graus Celsius.
g	Gramas
kg	Quilogramas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1. OBJETIVO.....	12
<b>1.1.1. Objetivo Geral.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>12</b>
1.2. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO .....	13
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1. DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO .....	14
2.2. CONSTITUINTES ESTRUTURAIS.....	15
2.3. MATERIAL FRESADO .....	17
2.4. MÁQUINA FRESADORA.....	17
2.5. TIPOS DE REAPROVEITAMENTO DE PAVIMENTO “ <i>IN SITU</i> ” .....	18
<b>2.5.1. Reciclagem “<i>in situ</i>” a frio .....</b>	<b>20</b>
<b>2.5.2. Reciclagem “<i>in situ</i>” a frio com cimento.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5.3. Reciclagem “<i>in situ</i>” a frio com emulsão betuminosa.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.4. Reciclagem “<i>in situ</i>” a frio com espuma .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.5. Reciclagem “<i>in situ</i>” a quente .....</b>	<b>28</b>
2.6. TIPOS DE ESTABILIZAÇÕES DE SOLO .....	31
<b>2.6.1. Estabilização mecânica.....</b>	<b>32</b>
<b>2.6.2. Estabilização física.....</b>	<b>32</b>
<b>2.6.3. Estabilização química .....</b>	<b>33</b>
2.7. ENSAIOS .....	33
<b>2.7.1. CBR (Califórnia Bearing Ratio) ou índice de suporte califórnia .....</b>	<b>34</b>
<b>2.7.2. Análise granulométrica por peneiramento.....</b>	<b>35</b>
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1. TIPO DE PESQUISA.....	36

3.2. LOCALIZAÇÃO DA JAZIDA.....	36
3.3. COLETA DOS DADOS .....	38
3.4. PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	39
3.5. COMPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	40
3.6. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS .....	41
<b>3.6.1. Ensaio de CBR .....</b>	<b>41</b>
<b>3.6.2. Ensaio de análise granulométrica por peneiramento .....</b>	<b>42</b>
<b>3.6.3. Umidade Higroscópica .....</b>	<b>43</b>
<b>3.6.4. Compactação .....</b>	<b>44</b>
<b>3.6.5. Limite de liquidez.....</b>	<b>44</b>
<b>3.6.6. Limite de plasticidade.....</b>	<b>45</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
4.1. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO COM ADIÇÃO .....	47
4.2. CLASSIFICAÇÃO DO CBR OU ISC.....	50
4.3. CLASSIFICAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE .....	52
4.4. BENEFÍCIOS AMBIENTAIS .....	53
<b>5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>59</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT) que realiza pesquisa anual sobre a qualidade das rodovias pavimentadas brasileiras, na pesquisa de 2014 mostrou que dos 98.475 km das rodovias verificou-se que 37,9% (37.361 km) das rodovias avaliadas foram classificadas em ótimo ou bom. Os demais 62,1% (61.114 km) foram qualificados como regular, ruim ou péssimo. Quanto aos resultados da classificação geral das rodovias por região geográfica, verificou-se que as regiões Sul e Sudeste continuam apresentando os maiores percentuais de trechos classificados como ótimo ou bom, com 51,8% e 39,6%, respectivamente. Em contrapartida, a região Norte obteve o maior percentual, 82,3%, de trechos classificados como regular, ruim ou péssimo, seguida pelas regiões Centro-Oeste e Nordeste, com percentuais acumulados de 69,3% e 65,4%, respectivamente (C.N.T, 2014).

Sendo o sistema rodoviário o principal meio de transporte no Brasil, responsável pela maior parte do escoamento de produção aos diversos centros urbanos espalhados pelo país, com suas estradas sucateadas surge a necessidade de investimento em melhorias do pavimento existente. Tendo em vista esta situação atual novas técnicas de construção, qualidade do material e eficiência nas condições de rolamento são estudados.

Os métodos de restauração de superfície mais empregados, hoje em dia, são a execução de uma camada asfáltica adicional sobre o revestimento existente e a fresagem com recomposição do revestimento asfáltico. Outra alternativa para a recuperação dos pavimentos deteriorados é a técnica de reciclagem, que consiste no reaproveitamento dos materiais existentes no pavimento (DAVID, 2006 p. 15)

A cada dia mais se discute sobre sustentabilidade e seus benefícios, o reaproveitamento de rejeito de obras de pavimentação é uma prática que nos permite desenvolver soluções eficientes que atendam as legislações específicas que vem sendo implantada gradativamente pelos órgãos ambientais que debatem sobre a redução da extração de materiais de fontes não renováveis, emissão de gases poluentes e resíduos descartados em locais inapropriados, a técnica de reciclagem de pavimentação deve ser verificada quanto ao seu desempenho técnico ao longo do período de projeto estipulado.

Devido ao exposto, o reaproveitamento de material fresado (MF) como adição em solo natural e estabilização granulométrica é foco deste trabalho de conclusão de curso.

## 1.1. OBJETIVO

### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização do material fresado oriundo das atividades de manutenção e restauração de rodovias antigas como adição em solo natural de baixa resistência como estabilização granulométrica de camadas de base e/ou sub-base de pavimentos rodoviários e/ou pavimentação urbana, estudo de caso de uma jazida localizada na cidade de Paraíso do Tocantins.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Verificar se a utilização de material reciclado como mistura e estabilização granulométrica na pavimentação de rodoviária é compatível com as normas vigentes e manuais de execução do DNIT;
- b) Apresentar os benefícios que tal reaproveitamento pode trazer ao meio ambiente por meio de literatura;
- c) Caracterizar a mistura obtida de acordo com o modelo de classificação de solo;
- d) Determinar as propriedades físicas do material da rodovia em estudo por meio de ensaios.

## 1.2. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Segundo (M. B. *et al.*) o Brasil perde cerca de U\$\$ 80 bilhões ao ano devido a falta de infraestrutura e logística para movimentar toda a sua produção interna e externa. Parte dos altos custos de produção poderia ser evitado se os modais fossem integrados, para tanto o investimento em rodovias pavimentadas e de grande importante econômica e investimento em novas tecnologias para os projetos estruturais.

Com o reaproveitamento de MF como mistura com solo natura de baixa resistência para base e sub-base de pavimentação de rodovias a ser testado nesse trabalho o material deverá adquirir maior resistência à ruptura e outras patologias decorrentes de material de má qualidade empregados em camadas anteriores ao revestimento flexível. Pode-se também ter economia quanto ao uso de solo de jazidas distantes que tenham características próprias para o emprego na reconstituição de asfáltico flexível.

Essa pesquisa e de grande relevância técnica, pois com os dados aqui apresentados será possível evoluir na forma de como são empregados os materiais que compõem a estrutura e construção de nossas rodovias, ampliando um campo amplo no melhoramento ambiental e social.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO

Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, apoiado sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito a infra-estrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito (DNIT, 2006).

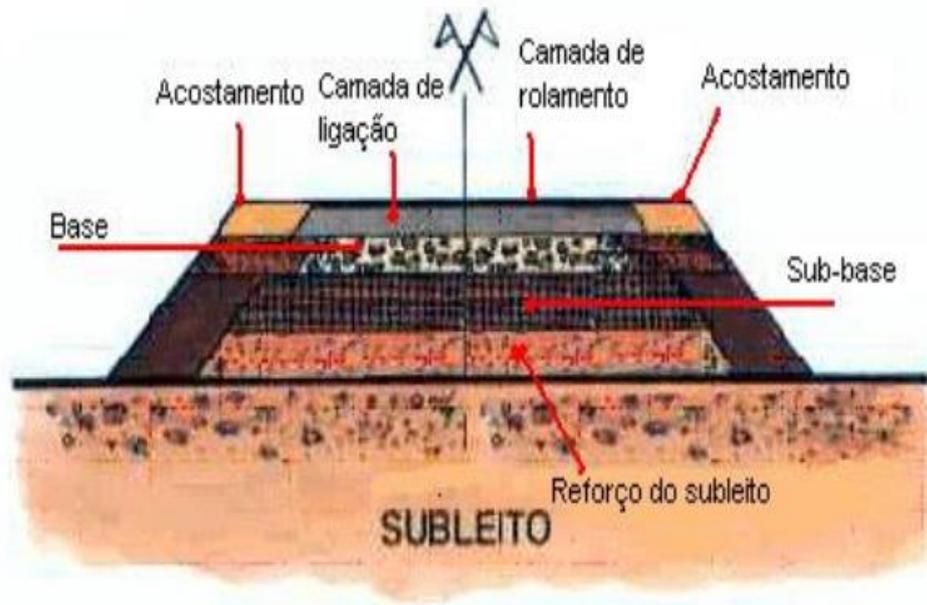
O subleito, limitado assim superiormente pelo pavimento, deve ser estudado e considerado até a profundidade onde atuam, de forma significativa, as cargas impostas pelo tráfego. Em termos práticos, tal profundidade deve situar-se numa faixa de 0,60 m a 1,50 m (DNIT, 2006).

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BARIANI, GORETTI, *et al.*, 2008).

Tradicionalmente se separam os pavimentos rodoviários em rígidos e flexíveis; os pavimentos rígidos são aqueles onde o revestimento é composto por uma placa de concreto de cimento Portland, já os flexíveis têm seu revestimento formado por uma mistura de agregados com ligantes asfálticos (BARIANI, GORETTI, *et al.*, 2008).

Os pavimentos asfálticos são formados basicamente por quatro camadas, sendo uma camada de revestimento asfáltico, seguida por uma de base, outra camada de sub-base e por fim uma camada de solo, conforme pode ser visualizado na Figura 1 (OLIVEIRA, 2014, p 28).

**Figura 1:** Camadas constituintes dos pavimentos asfálticos rodoviários

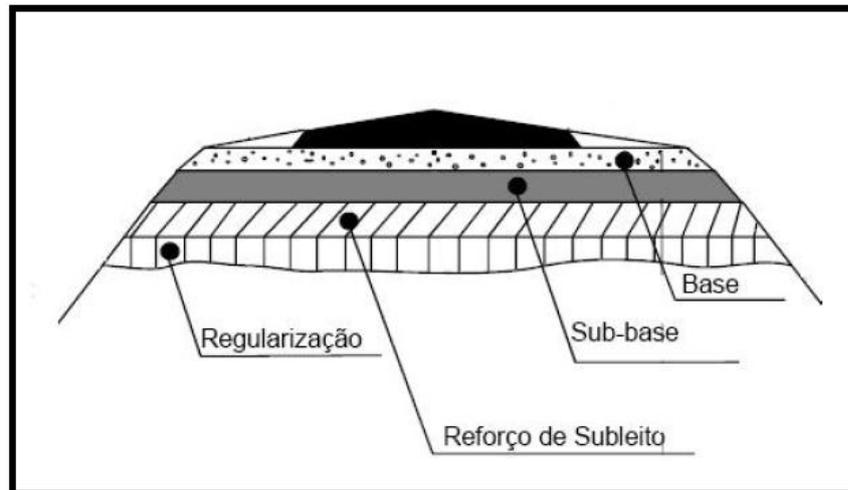


Fonte: (OLIVEIRA, 2014)

## 2.2. CONSTITUINTES ESTRUTURAIS

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de binder, embora essa designação possa levar a certa confusão, uma vez que esse termo é utilizado na língua inglesa para designar o ligante asfáltico. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros (Figura 2) (BARIANI, GORETTI, *et al.*, 2008).

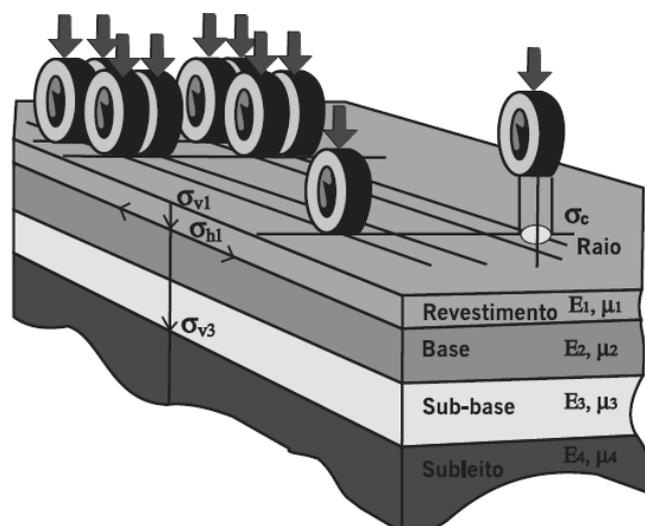
**Figura 2:** Seção transversal de um pavimento flexível



Fonte: (DNIT, 2006)

As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas ao trincamento por fadiga dessa camada. Ela ainda pode apresentar trincamento por envelhecimento do ligante asfáltico, ação climática etc. Parte de problemas relacionados à deformação permanente e outros defeitos pode ser atribuída ao revestimento asfáltico. Nos pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural. Limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento (Figura 3), por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes, é o objetivo da mecânica dos pavimentos (MEDINA, 1997).

**Figura 3:** Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes



Fonte: (ALBERNAZ, 1997)

BALBO, (2007) defende que o pavimento poderá não possuir camada de sub-base ou de reforço, mas a existência de revestimento e subleito são condições mínimas para que a estrutura seja chamada de pavimento. Ainda explica que a estrutura do pavimento é concebida para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes.

### 2.3. MATERIAL FRESADO

Segundo BONFIM (2007) apud BARROS (2013), 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 (BARROS, 2013).

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 (BARROS, 2013).

### 2.4. MÁQUINA FRESADORA

Existem varios modelos e tipos de máquina fresadora, mas as suas principais características estão dispostas a seguir (Figura 4) de acordo com (WIRTGEN GROUP, 2010);

- Capacidade mecânica e dimensões que permitam a execução da fresagem de maneira uniforme, com dispositivos que permitam graduar corretamente a profundidade de corte;
- Possuir comando hidráulico que permita variações na espessura de fresagem, com uma largura mínima de 0,20 m até a largura de 3,80;

- Capacidade de nivelamento automático e precisão de corte que permitam o controle de conformação da inclinação transversal para satisfazer o projeto geométrico;
- Dispositivo que permita a remoção do material cortado simultaneamente à operação de fresagem, com a elevação do material removido na pista para a caçamba do caminhão basculante;
- Os dentes do tambor fresador devem ser cambiáveis e permitir que sejam extraídos e montados através de procedimentos simples e práticos, visando o controle de largura de corte.
- Dispositivo que permita a asperção de água para controlar a emissão de poeira emitida na operação de fresagem

**Figura 4:** Máquina Fresadora



Fonte: (WIRTGEM, 2015)

## 2.5. TIPOS DE REAPROVEITAMENTO DE PAVIMENTO “*IN SITU*”

A pavimentação tem como principal objetivo garantir a trafegabilidade e proporcionar ao usuário conforto ao rolamento e segurança. Portanto, para o usuário o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos na superfície afetam o conforto ao

rolamento e aumentam os custos operacionais. O fato do pavimento apresentar deterioração funcional e estrutural, acumuladas ao longo da sua vida de projeto, faz com que uma manutenção periódica seja necessária para assegurar as condições mínimas de trafegabilidade, conforto e segurança (BARIANI, GORETTI, *et al.*, 2008).

Restauração está associada a uma variedade de correções de defeitos funcionais superficiais, através da aplicação de técnicas como: tratamentos superficiais, recapamentos, etc., mas independentemente da técnica, a superfície existente precisa ser reparada, caso contrário a solução adotada terá seu desempenho comprometido pela reflexão das trincas (BARIANI, GORETTI, *et al.*, 2008; PAPAGIANNAKIS e MASAD, 2008)).

A utilização da técnica de reciclagem apresenta, de acordo com (ALKINS et al. 2008) apud CUNHA (2010) pag.19, de um modo geral, os seguintes benefícios (Figura 5):

- **Benefícios Ambientais:**

- Diminuição das zonas de vazadouro - com a reciclagem do pavimento, os materiais provenientes do mesmo voltam a ser utilizados no novo pavimento, com a consequente eliminação ou diminuição das zonas de vazadouro, que constituem um problema ambiental;
- Redução da utilização de novos agregados - trata-se de um recurso não renovável. A extração, produção e transporte dos agregados consome energia, para além de ter um elevado impacto ambiental negativo.

- **Benefícios Económicos:**

- O fornecimento de betumes e agregados com qualidade, para a construção e reabilitação de pavimentos, tem sido nos últimos anos, cada vez mais limitado. Para além disso, tem-se verificado um substancial incremento nos custos dos materiais, dos equipamentos, dos combustíveis e transportes, o que leva a que a reciclagem dos materiais já presentes no pavimento seja naturalmente encorajada.

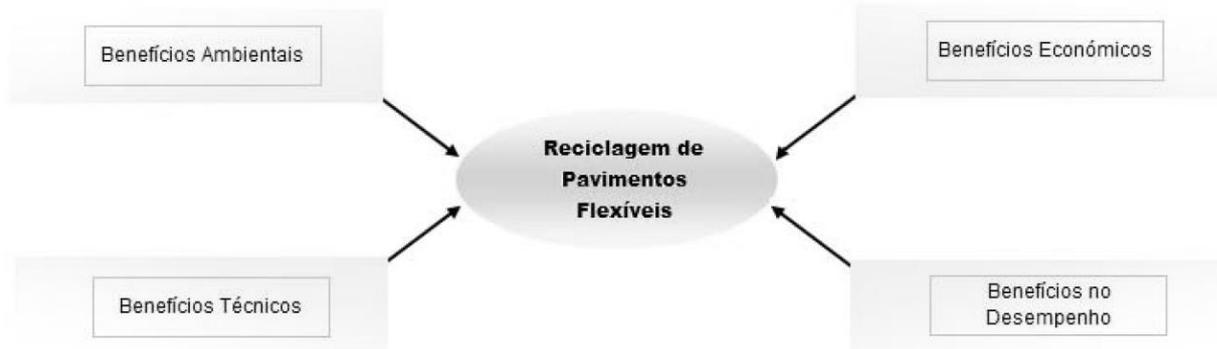
- **Benefícios no Desempenho**

- Permite a reabilitação das características estruturais de um pavimento degradado reutilizando o material já existente.

- **Benefícios Técnicos**

- Com a técnica de reciclagem conseguem-se melhorias estruturais ou de regularidade do pavimento (mantendo a rasante), evitando-se assim problemas com grandes modificações na estrada e no gabarit associado a passagens superiores.

**Figura 5:** Benefícios gerais da técnica de reciclagem de pavimentos



Fonte: (ALKINS, LANE e KAZMIEROWSKI, 2008)

### 2.5.1. Reciclagem “*in situ*” a frio

Segundo (CUNHA, 2010) no que diz respeito a reciclagem “*in situ*” a frio, as camadas degradadas do pavimento são fresadas, de modo a serem reduzidas a dimensões apropriadas, para depois serem misturadas a frio com um aglutinante, no próprio local da obra.

De acordo com o DEFENSE (2001), este tipo de reciclagem permite que os materiais provenientes do antigo pavimento, possam ser novamente utilizados numa camada de base do novo pavimento reabilitado.

Uma vez que se trata de uma técnica a frio, os consumos de energia são menores quando comparados com as técnicas a quente, por não haver a necessidade de aquecer o material. A reciclagem “*in situ*” a frio apresenta também menores níveis de emissão de gases tóxicos para a atmosfera quando comparada com uma solução tradicional de reabilitação de um pavimento (CUNHA, 2010).

Já na fase de execução, os equipamentos necessários à realização da técnica de reciclagem “*in situ*” a frio são no mínimo uma máquina recicladora, cisternas para água e ligantes, motoniveladora e cilindros, os quais formam um comboio, frequentemente denominado por “comboio de reciclagem”, tal como se mostra na Figura 6 (CUNHA, 2010).

**Figura 6:** "Comboio" de Reciclagem



Fonte: (WIRTGEM, 2009)

A fase de execução tem início com a passagem em primeiro lugar da máquina recicladora. A máquina recicladora procede de forma contínua à desagregação do pavimento existente, à adição de água e do ligante através de injectores existentes no rotor da máquina (Figura 7), à mistura do material, e finalmente ao seu espalhamento. Se na fórmula de trabalho ficou estabelecido que seria necessário material correctivo, nomeadamente agregados, estes devem ser colocados sobre o pavimento antes da passagem da máquina recicladora, para que quando esta passe se proceda às correcções estabelecidas (CUNHA, 2010).

**Figura 7:** Rotor de uma máquina recicladora



Fonte: (WIRTGEM, 2009)

De forma a garantir a homogeneidade da camada reciclada, a máquina recicladora deverá avançar a uma velocidade lenta e uniforme, evitando-se paragens. Quando tal for imprescindível, deverá cortar-se de imediato o fornecimento de ligante e água para evitar sobredosagens ou encharcamentos (AZEVEDO, 2009b).

### 2.5.2. Reciclagem “*in situ*” a frio com cimento

A utilização do cimento permite um grande aumento na capacidade de suporte do pavimento, sem que para isso seja necessário recorrer a uma camada com elevada espessura. A reciclagem “*in situ*” a frio com cimento é indicada para situações em que o pavimento a reabilitar apresenta degradações com elevada extensão, ou em casos em que existem restrições de subida de cota do pavimento (CUNHA, 2010).

A camada reciclada “*in situ*” a frio com cimento acaba por constituir segundo (PICADO-SANTOS e BAPTISTA, 2008) uma camada do tipo agregado de granulometria extensa tratado com cimento e apresenta resistência muito mais elevada que a anterior, passando a estrutura final a ser idêntica a um pavimento semi-rígido (Figura 8).

**Figura 8:** Estrutura de um pavimento reciclado “*in situ*” a frio com cimento



Fonte: (PICADO-SANTOS e BAPTISTA, 2008)

Na fase de execução deste tipo de reciclagem, a sequência construtiva é idêntica à já referida para a técnica “*in situ*” a frio. No entanto, quando a reciclagem “*in situ*” a frio utiliza como ligante o cimento, deverá ser acoplado à recicladora uma misturadora (Figura 9) (WIRTGEM, 2009).

**Figura 9:** Conjunto recicladora e misturadora



Fonte: (WIRTGEM, 2009)

A misturadora (Figura 10) é uma unidade com capacidade para armazenar água, cimento e aditivos (se necessário), onde é fabricada a calda de água e cimento que depois será bombeada para os injectores existentes no rotor da recicladora. O cimento deverá ficar disperso na mistura de forma homogénea, que por sua vez, deverá apresentar uma cor uniforme (WIRTGEM, 2009).

**Figura 10:** Esquema de uma misturadora



Fonte: (Adaptado de Wirtgen, 2009)

### 2.5.3. Reciclagem “*in situ*” a frio com emulsão betuminosa

As emulsões betuminosas podem ser definidas como dispersões, relativamente estáveis, de gotículas de betume convencional (fase dispersa ou descontínua) em água – meio emulsionante (fase contínua). Temos assim um sistema heterogéneo, comportando duas fases líquidas não miscíveis, onde uma das fases se encontra dispersa dentro de outra fase sob a forma de finas gotículas com dimensões entre 0,1 e 5 microns de diâmetro (CUNHA, 2010).

Em função da carga das partículas do betume, existem dois tipos de emulsões betuminosas, as aniónicas (carga negativa) e as catiónicas (carga positiva). Em termos de rapidez de rotura das emulsões betuminosas podemos ter rotura rápida, média ou lenta e podemos ainda caracterizar as emulsões em função da sua viscosidade, baixa, média ou alta.

Segundo (FONSECA, 2002) as emulsões mais utilizadas na reciclagem são as catiónicas de rotura lenta, as quais proporcionam um correcto envolvimento com os agregados que resultam do processo de fresagem do pavimento antigo e permitem que o espalhamento da mistura se faça antes da rotura da emulsão.

É importante garantir uma boa afinidade entre a emulsão escolhida e o material a tratar, para que no futuro a camada reciclada não apresente anomalias que comprometam o sucesso da reciclagem, daí a importância fundamental de se realizar um trecho experimental, onde é possível testar a adesividade entre a emulsão betuminosa escolhida e o material reciclado, bem como as percentagens de emulsão betuminosa a utilizar. O trecho experimental permite ainda avaliar sobre a necessidade de se proceder à adição de material corretivo.

Este tipo de reciclagem visa sobretudo recuperar camadas de desgaste envelhecidas em pavimentos com valor estrutural adequado às condições de tráfego, abrangendo regra geral a espessura da camada de desgaste, acrescida de 3cm de forma a englobar a interface com a camada adjacente, que seria seriamente afectada pela violenta operação de fresagem (PICADO-SANTOS, 2008)

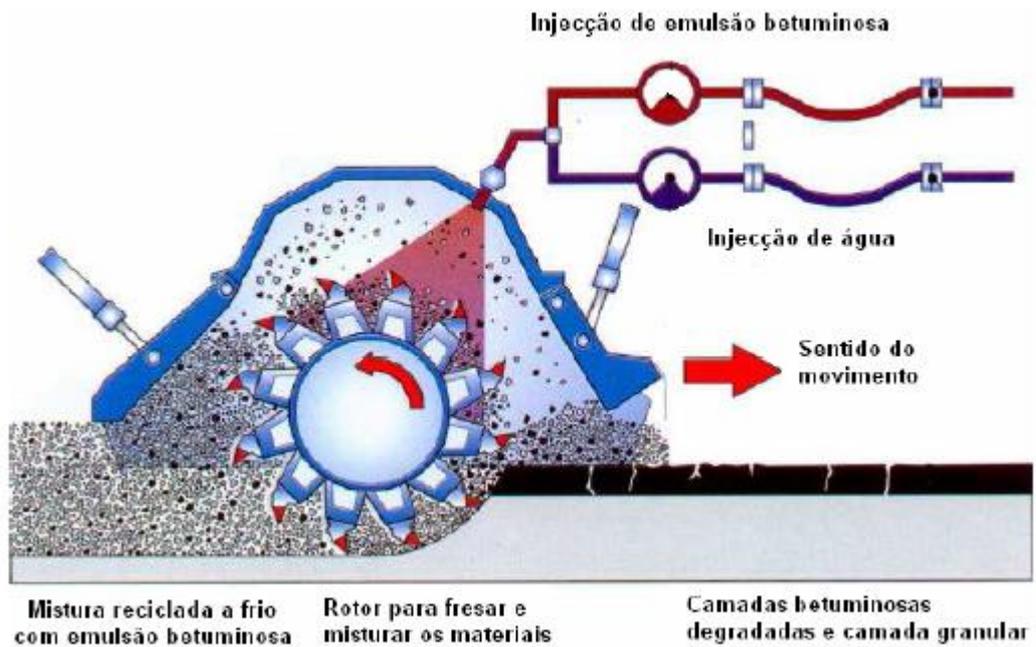
São utilizados “comboios” constituídos por uma máquina recicladora, à qual é acoplada desta vez, uma cisterna para água e outra para emulsão (Figura 11). A máquina recicladora procede à mistura da emulsão betuminosa com o material fresado e com a água, e ao espalhamento desta mesma mistura (Figura 12). Como o teor em emulsão betuminosa é relativamente baixo, existe a necessidade de adicionar água, especialmente se os agregados estiverem secos. De seguida procede-se à compactação da camada (CUNHA, 2010).

**Figura 11:** "Comboio" composto pela máquina recicladora, cisternas para água e emulsão betuminosa



Fonte: (BATISTA e ANTUNES, 2009)

**Figura 12:** Esquema de produção da mistura reciclada "in situ" com emulsão betuminosa



Fonte: (COSTA - BAPTISTA, 2006)

#### 2.5.4. Reciclagem “*in situ*” a frio com espuma

A reciclagem com espuma de betume é um processo de reabilitação de pavimentos que envolve a mistura de espuma de betume com o material proveniente da reciclagem do pavimento existente, produzindo um pavimento de alta qualidade, durável e flexível com um desempenho excepcional e resistente aos efeitos de climas extremos (SEIXAS, 2008).

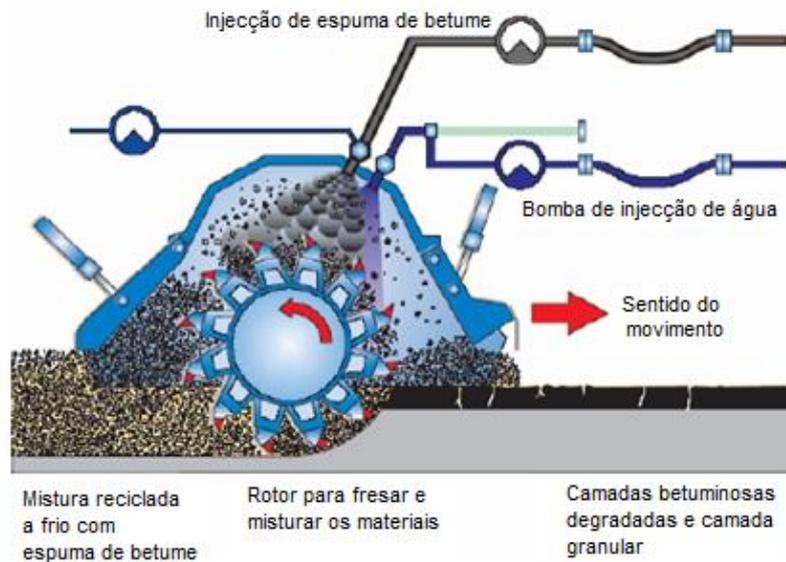
O objetivo da fabricação da espuma de betume é a redução da viscosidade do betume possibilitando o envolvimento dos agregados, ou areias naturais e mesmo argilas com baixa plasticidade.

De acordo com (SEIXAS, 2008), a espuma de betume subsiste durante um período de 10 a 20 segundos, período durante o qual é feita a mistura com o material a reciclar. Enquanto espuma, não reveste completamente a superfície dos agregados, apenas envolve os finos formando uma argamassa, que efetivamente aglutina o material reciclado. A mistura betuminosa final passa a apresentar características particulares pelo uso da espuma de betume. Não apresenta cor preta, como é característica das misturas betuminosas.

Apesar de ser necessário o aquecimento do betume, este tipo de reciclagem não é considerada uma técnica a quente, uma vez que a mistura dos componentes (espuma de betume, material fresado e eventualmente aditivos), a colocação, e compactação da mistura são efetuadas à temperatura ambiente.

O betume quente é bombeado desde o tanque de betume até à recicladora, através de mangueiras providas para o efeito e injetadas, juntamente com uma determinada quantidade de água, através da barra pulverizadora, localizada na proximidade do rolo misturador. A água, em contato com o betume quente, provoca a expansão deste formando uma espuma de betume que se mistura com o material do pavimento (Figura 13). Seguem-se posteriormente as operações de nivelamento e compactação da camada (SEIXAS, 2008).

**Figura 13:** Esquema de produção da mistura reciclada “*in situ*” a frio com espuma de betume



Fonte: (COSTA - BAPTISTA, 2006)

A reciclagem mostra ser uma boa alternativa técnica e económica às soluções tradicionais, nomeadamente no que respeita ao saneamento do pavimento existente e à execução de novas camadas (VICENTE, 2006).

De acordo com SEIXAS (2008) o tratamento de pavimentos flexíveis degradados com recurso à técnica “*in situ*” a frio com espuma de betume permite a obtenção de uma nova camada estrutural resistente às deformações plástica e durável, mesmo em situações de climas extremos (Figura 14).

**Figura 14:** Reciclagem “*in situ*” a frio com espuma de betume



Fonte: (VICENTE, 2006)

As perturbações do trânsito são mínimas. Segundo SEIXAS (2008) a reposição da circulação é imediata, podendo mesmo após a circulação proceder-se ao reperfilamento da via, sem qualquer inconveniente ou perda de resistência do material desde que se mantenha a percentagem de água utilizada na compactação.

#### **2.5.5. Reciclagem “*in situ*” a quente**

Este tipo de reciclagem difere da reciclagem “*in situ*” a frio, quanto à temperatura de reciclagem, tipo de ligante e equipamento principal de reciclagem.

Na verdade, a técnica de reciclagem “*in situ*” a quente, ao contrário de todos os outros tipos de reciclagem, não permite a reabilitação das características estruturais de pavimentos flexíveis degradados. Trata-se de uma técnica que permite apenas a reabilitação das características funcionais do pavimento ao nível da camada de desgaste, não podendo sequer ser utilizada em situações em que o pavimento apresente defeitos ao nível das camadas estruturais do pavimento.

Pode deste modo, considerar-se que esta é uma técnica de reabilitação das características funcionais dos pavimentos flexíveis.

De acordo com o (DEFENSE, 2001) este tipo de reciclagem é utilizada para diminuir a permeabilidade do pavimento à água, melhorar as propriedades do ligante envelhecido e aumentar a resistência à derrapagem.

No que diz respeito ao ligante para a técnica de reciclagem “*in situ*” a quente é geralmente utilizado um produto rejuvenescedor, que comporta os componentes do betume que se perderam como consequência do seu envelhecimento, devolvendo ao betume as suas características (físicas e químicas) perdidas. Consoante a composição do betume envelhecido, teremos a composição do rejuvenescedor, uma vez que se trata de produtos feitos à medida para as circunstâncias concretas de cada projeto (COSTA - BAPTISTA, 2006).

A reciclagem “*in situ*” a quente envolve um “comboio” de equipamentos bastante complexos, sendo que um deles está munido de painéis radiantes, que no local elevam a temperatura da superfície do pavimento, facilitando assim, a desagregação do material superficial, por uma fresadora. O material depois de solto é então misturado de forma uniforme num aquecedor-misturador, com um produto rejuvenescedor e eventualmente material corretivo, nomeadamente agregados virgens ou aditivos, caso seja necessário. A mistura é espalhada por uma pavimentadora e compactada por equipamentos idênticos

àqueles que são utilizados para a reciclagem “*in situ*” a frio. A Figura 15 representam-se os equipamentos necessários e a sua sequência de intervenção neste tipo de reciclagem (COSTA - BAPTISTA, 2006).

**Figura 15:** Fases da reciclagem a quente “*in situ*”



Fonte: (COSTA - BAPTISTA, 2006)

O pavimento é aquecido através de um circuito de ar quente -até 600°C (Figura 16) o que, com ajuda de um sistema de infravermelhos que está sobreposto à camada a reciclar, permite que o pavimento atinja temperaturas de 150°C a 160°C numa espessura até 7cm. Seguidamente o pavimento quente é fresado, entrando posteriormente no misturador (Figura 17), onde se junta o agente rejuvenescedor. Seguidamente a mistura é colocada numa espalhadora de misturas (Figura 18) e compactada (FONSECA, 2002).

Segundo o (DEFENSE, 2001), a qualidade das misturas betuminosas recicladas “*in situ*” a quente é difícil de controlar, por estar muito dependente de variados fatores, nomeadamente, profundidade de reciclagem, tempo de exposição do pavimento aos pré-aquecedores, quantidade e natureza do produto rejuvenescedor e ainda do processo de compactação da camada reciclada.

A utilização da reciclagem “*in situ*” a quente está limitada a espessuras máximas da ordem dos sete centímetros, uma vez que para se conseguirem temperaturas suficientemente elevadas em profundidade teríamos um aquecimento excessivo na superfície, que teria como consequência o envelhecimento do betume, precisamente o contrário daquilo que se pretende com a utilização deste tipo de reciclagem.

**Figura 16:** Pré-aquecedores utilizados na reciclagem “*in situ*” a quente



Fonte: (MARTEC, 2009)

Para este tipo de reciclagem, distinguem-se dois processos: a termorregeração e a termorreperfilagem.

A termorreperfilagem consiste apenas no aquecimento do pavimento, seguido da sua compactação, tendo por objetivo selar as fendas existentes e repor a regularidade do perfil longitudinal. Neste processo não há lugar à adição de novos materiais ou misturas. A termorregeração compreende o aquecimento do pavimento, a sua escarificação, recomposição, nivelamento e compactação da nova camada (PICADO-SANTOS e BAPTISTA, 2008).

**Figura 17:** Misturador



Fonte: (MARTEC, 2009)

**Figura 18:** Espalhamento da mistura



Fonte: (MARTEC, 2009)

Nos casos em que é aplicada a termorregeneração poderá optar-se pela aplicação de uma nova camada de misturas betuminosas novas sobre a camada reciclada, passando esta nova camada a funcionar como camada de desgaste.

Segundo (BAPTISTA 2004), a adição de novos materiais corretivos está limitada a uma taxa de 30% da massa do material reciclado, devido a limitações do equipamento envolvido no processo.

A técnica de reciclagem “*in situ*” a quente utiliza equipamento muito específico e com custo muito elevado, quando comparada com outros equipamentos utilizados em outros tipos de reciclagem “*in situ*”. Além disso, o facto de ser necessário o aquecimento do pavimento leva a que esta técnica apresente elevados consumos de energia.

Para (PICADO-SANTOS e BAPTISTA, 2008) esta técnica apresenta também dificuldades de aplicação, não podendo ser utilizada quando o pavimento apresenta obstáculos, para além de um significativo grau de poluição, com consequentes impactos ambientais.

## 2.6. TIPOS DE ESTABILIZAÇÕES DE SOLO

A estabilização de solo consiste em um procedimento de alteração física, mecânica ou química do solo para a obtenção de características satisfatórias para suportar as cargas exigidas pelo tráfego intenso sob o pavimento flexível.

As propriedades de engenharia que se visa modificar na estabilização de um solo, segundo MEDINA e MOTTA (2004), são: resistência ao cisalhamento, tornandoa 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.

### **2.6.1. 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, ressupondo 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).

Exemplos de máquinas utilizadas para compactação mecânica;

- Rolo liso;
- Rolo vibratório;
- Rolo pneumático;
- Rolo pé-de-carneiro;
- Soquete vibratório;
- Compactador vibratório tandem;
- Compactador vibratório tracionado.

### **2.6.2. 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).

São utilizados aditivos que interagem com as partículas de solo visando melhoria e estabilidade nas propriedades mecânicas e hidráulicas tendo um ganho significativo de resistência.

Exemplos:

- Cal;
- Cimento;
- Asfaltos ou Betumes.

### **2.6.3. 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 argilominerais e modificam o pH da solução eletrolítica. Os produtos cimentantes que se formam posteriormente (diz-se reação pozolânica) acrescem a rigidez da mistura (MEDINA,1987).

Exemplos aditivos químicos para estabilização de solo

- Cloretos de sódio e cálcio;
- Ácidos fosfórico.

## **2.7. ENSAIOS**

Em obras de pavimentação rodoviária é de extrema importância que se realizem vários ensaios laboratoriais para conhecimento do desempenho dos materiais utilizados durante a execução e assim, ter a confirmação de que os serviços executados atendem as especificações mínimas exigidas pelas normas.

### 2.7.1. CBR (Califórnia Bearing Ratio) ou índice de suporte califórnia

De acordo com BALDO, (2007), O CBR – Califórnia Bearing Ratio, é a relação de resistência à penetração de um pistão de 2” entre o solo propriamente dito e um corpo-de-prova de brita graduada do tipo de material utilizado em camadas de pavimentos que apresentavam um bom desempenho nos pavimentos na Califórnia, onde esta brita graduada tem valor correspondente a 100%.

Conforme descrito no método de ensaio da NBR 9895:1987 Solo: índice de suporte Califórnia, trata-se de um método de ensaio empírico, adotado por grande parcelas dos órgãos rodoviários no Brasil e no mundo, onde, com sua realização é possível determinar o ISC e a expansão do material. A figura 19 mostra a realização do ensaio.

**Figura 19:** Penetração do corpo-de-prova



Fonte: (SILVA, 2012)

A aceitação ou rejeição segundo a NORMA do DNIT (141/2010) Índice Suporte Califórnia:

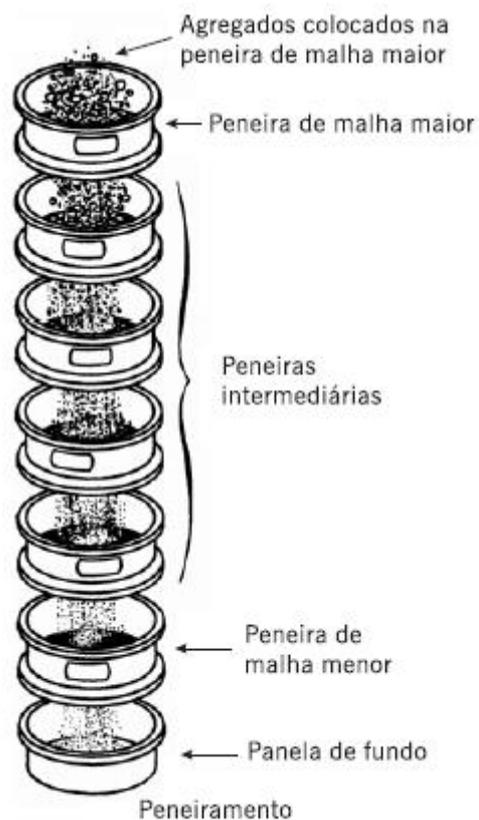
- $ISC \geq 60\%$  para Número  $N \leq 5 \times 10^6$ ;
- $ISC \geq 80\%$  para Número  $N > 5 \times 10^6$ ;
- Expansão  $\leq 0,5\%$ .

### 2.7.2. Análise granulométrica por peneiramento

Segundo BERNUCCI (2008), A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida etc.

A distribuição granulométrica dos agregados é determinada usualmente por meio de uma análise por peneiramento, cujo procedimento é normatizado pela (NBR 7181/1988): Solo: análise granulométrica. Nessa análise uma amostra seca de agregado é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malha progressivamente menores, conforme ilustrado na Figura 20. Uma vez que a massa da fração de partículas retida em cada peneira é determinada e comparada com a massa total da amostra, a distribuição é expressa como porcentagem em massa em cada tamanho de malha de peneira.

**Figura 20:** Ilustração da análise por peneiramento



Fonte: (Bernucci, 2008)

### 3. METODOLOGIA

Esta é uma pesquisa de caráter exploratório onde são discriminadas todas as classificações físicas da adição de material fresado em solo laterítico (cascalho) para base e sub-base de pavimento flexível para a elaboração de um pavimento mais econômico e que atenda as solicitações impostas pelo tráfico de veículos. Assim tendo embasamento técnico para a elaboração de um novo pavimento reciclado.

Serão apresentados:

- Os processos utilizados;
- Equipamentos;
- Local de obtenção das amostras;
- Ensaios.

#### 3.1. TIPO DE PESQUISA

O referente trabalho trata-se de uma pesquisa para quantificar e qualificar um novo pavimento reciclado, ou seja, com o reaproveitamento do material fresado pode-se reforçar solos de jazidas que antes eram dispensadas por não apresentarem características técnicas para a utilização na pavimentação rodoviária, tendo benefícios ambientais, porque antes materiais que eram descartados na natureza agora podem beneficiar as empresas que trabalham no ramo.

#### 3.2. LOCALIZAÇÃO DA JAZIDA

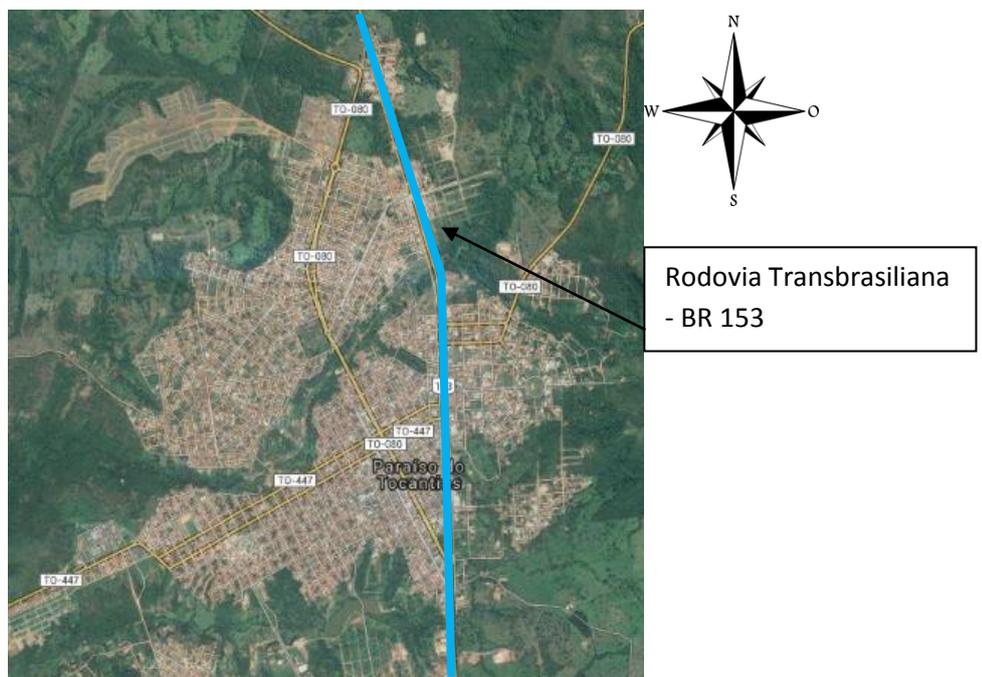
Os corpos de provas serão coletados na rodovia transbrasiliana BR 153, classificada como longitudinal (rodovias que se orientam no sentido norte-sul), no município de Paraíso do Tocantins (Figura 22) a cerca de 1 h 9 min. de percurso a 75,0 km da capital do Estado do Tocantins (Figura 21), Palmas, via TO-080, onde fica localizada a sede do DNIT onde é armazenado o material fresado necessário para os ensaios.

**Figura 21:** Estado do Tocantins



Fonte: Google Maps, 2015

**Figura 22:** Município de Paraíso do Tocantins



Fonte: Google Maps, 2015

### 3.3. COLETA DOS DADOS

De acordo com o método de ensaio DNER-ME 049/94, o ensaio de CBR deve ser repetido em cinco amostras diferentes. Já para o ensaio de análise granulométrica o método de ensaio DNER-ME 080/94 diz que a quantidade mínima de amostras para solos cujos grãos têm tamanho de 5 a 25mm, determinado por observação visual, deverá ser de 4 amostras, portanto, resolveu-se que seriam coletadas 4 amostras para cada ensaio.

Foram coletadas duas amostras de material fresado e duas de solo laterítico, uma amostra para a realização do ensaio de análise granulométrica e outra para o ensaio de CBR.

Após a coleta, o material foi transportado para o laboratório da Centro Universitário Luterano de Palmas - CEULP/ULBRA para que sejam realizados os ensaios necessários.

Foram coletados cerca de 50 kg de material fresado e 50 kg de material laterítico (cascalho) para a realização dos ensaios, são aproximadamente 5 kg para os ensaios de CRB para cada composições de porcentagens diferentes e 1 kg para os ensaios de granulometria para compor as camadas de base e sub-base, conforme Imagem 1.

**Imagem 1:** Coleta do material fresado.



Fonte: O Autor, (2015)

O solo laterítico foi coletado em uma jazida que se encontra atrás do Auto Posto Carneirão Ltda. – EPP, localizado em Paraíso do Tocantins – Rodovia Br 153 km 499 S/N, conforme Figura 23.

**Figura 23:** Localização da jazida de solo laterítico.



Fonte: Google Maps, 2015

### 3.4. PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A produção dos corpos de prova foi realizada no próprio laboratório onde serão executados os ensaios e obedecerá ao procedimento preconizado nos métodos de ensaios do DNER-ME 080/94 - Solos - análise granulométrica por peneiramento e DNER-ME 049/94 – Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.

Fórmulas para determinar ISC:

Massa específica aparente úmida  $\mu_h$ .

$$\mu_h = \frac{P_h}{V}, \text{ em g/cm}^3$$

Onde:

$P_h$  – Peso do solo úmido compactado;

$V$  – Volume do solo úmido compactado, em  $\text{cm}^3$

Massa específica aparente do solo seco compactado  $\mu_s$

$$\mu_s = \mu_h \times \frac{100}{100 + h} \text{ em g/cm}^3$$

ISC em porcentagem.

$$\text{ISC} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100$$

Obs: Adotando-se o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

### 3.5. COMPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Na composição da mistura do material fresado com o solo, as hipóteses abordadas foram às combinações apresentadas na Tabela 1, às porcentagens das amostras foram definidas em laboratório por mim e pelo meu professor orientador.

**Tabela 1** - Composições dos corpos-de-prova

CORPOS DE PROVA	TIPO DE ENSAIO	COMPOSIÇÃO	DATA DA COLETA
CP 01	CBR/ISC	100% CASCALHO	03/08/2015
CP 02	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	100% CASCALHO	03/08/2015
CP 03	CBR/ISC	80% CASCALHO / 20% MF	03/08/2015
CP 04	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	80% CASCALHO / 20% MF	03/08/2015
CP 05	CBR/ISC	60% CASCALHO / 40% MF	03/08/2015
CP 06	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	60% CASCALHO / 40% MF	03/08/2015
CP 07	CBR/ISC	30% CASCALHO / 70% MF	03/08/2015
CP 08	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	30% CASCALHO / 70% MF	03/08/2015
CP 09	CBR/ISC	100% MF	03/08/2015

Fonte: O Autor, (2015)

### 3.6. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais dos corpos de prova serão realizados conforme normas técnicas do DNIT. Os métodos para a realização de cada ensaio serão conforme descrito nos itens a seguir.

#### 3.6.1. Ensaio de CBR

Conforme preconizado no método de ensaio do DNIT e DNER-ME 049/94, o ensaio de CBR deve obedecer o procedimento descrito a seguir:

Expansão:

- Coloca-se o disco espaçador no cilindro, cobrindo-o com papel filtro;
- Compacta-se o corpo de prova à umidade ótima (03 camadas e 26 golpes do soquete caindo de 45cm) e, invertendo-se o cilindro, substitui-se o disco espaçador pelo prato perfurado com haste de expansão e pesos. Esse peso ou sobrecarga corresponderá ao do pavimento e não deverá ser inferior a 4,5kg conforme;
- Emerge-se o cilindro com o corpo de prova e sobrecarga no tanque durante 96 horas, de tal forma que a água banhe o material tanto pelo topo quanto pela base;
- Realiza-se leituras de deformação (expansão ou recalque) com aproximação de 0,01mm. a cada 24h conforme Imagem 2;

**Imagem 2:** Leitura das deformações do solo



Fonte: O Autor, (2015)

- Terminada a “saturação”, deixa-se escorrer a água do corpo de prova durante 15 minutos e pesa-se o cilindro + solo úmido.

#### Penetração

- Instala-se o conjunto, molde cilíndrico com corpo de prova e sobrecarga, na prensa;
- Assenta-se o pistão da prensa na superfície do topo do corpo de prova, zerando-se em seguida os extensômetros;
- Aplica-se o carregamento com velocidade de 1,27 mm/min, anotando-se a carga e a penetração a cada 30 segundos até decorridos o tempo de 6 minutos.

### 3.6.2. Ensaio de análise granulométrica por peneiramento

Como o objetivo deste trabalho é analisar as características do material fresado para a aplicação em camadas granulares, realizou-se a análise granulométrica para verificar o enquadramento dos materiais nas faixas, propostas pela DNER-ES 303/97, para base estabilizada granulometricamente e para que o material fosse classificado segundo o sistema

unificado de classificação de solos do DNIT. Portanto utilizou-se as peneiras de 50, 38, 25, 19, 9.5, 4.8, 2.0, 0.42 e 0.075mm, conforme descrito na referida norma.

O processo de peneiramento foi orientado pela DNER-ME 080/94.

- Secou-se a amostra de solo em estufa ( $110 \pm 5$ ) °C, então esfriou o material à temperatura ambiente e determinou-se sua massa total.
- Desmancharam-se os torrões, evitando a quebra dos grãos, e homogeneizou-se a amostra.
- Pelo método de quarteamo, reduziu-se a quantidade de material até se obter uma amostra representativa em quantidade suficiente para a realização do ensaio.
- Realizou-se então o peneiramento na série de peneiras descrita, pela agitação mecânica do conjunto.
- Após o peneiramento foi pesado em sequência, com aproximação de 0,1% sobre a massa da amostra total, o material retido em cada peneira conforme Imagem 3 .

**Imagem 3:** Pesagem do material retido em cada peneira



Fonte: O Autor, (2015)

### 3.6.3. Umidade Higroscópica

Tomam-se cerca de 50 g de material seco ao ar que passa na peneira de 2,0 mm e determina-se sua umidade pela fórmula:

Formula:

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Onde:

h – Teor de umidade, em porcentagem;

Ph – Peso do material úmido;

Ps – Peso do material seco em estufa a 105 °C – 110 °C até constância de peso.

Fazem-se as pesagens com aproximação de 0,01 g.

#### 3.6.4. Compactação

Inicialmente, deve-se calcular para cada corpo de prova o peso do solo compactado. Esse valor é obtido subtraindo-se o “peso do cilindro” do “peso do cilindro + solo compactado”. O próximo passo consiste em calcular o peso específico aparente do solo úmido  $\gamma_s$ , de acordo com a (NBR 7182/1988):.

$$\gamma_s = \frac{P_h \times 100}{V (100 + h)}$$

Onde:

$\gamma_s$  - Massa específica aparente seca, em g/cm<sup>3</sup>;

Ph - Peso úmido do solo compactado, em g;

V - Volume útil do molde cilíndrico, em cm<sup>3</sup>;

h – Teor de umidade do solo compactado em %

#### 3.6.5. Limite de liquidez

O ensaio do limite de liquidez é realizado em um aparelho denominado aparelho de Casagrande, que consiste essencialmente de uma concha metálica que, acionada por uma manivela, golpeia a base do citado aparelho. O ensaio é feito com a fração da amostra representativa do solo que passa na peneira de 0,42 mm de abertura de malha (peneira n° 40).

A quantidade de material necessária para o ensaio é de cerca de 70 g.

- Colocam-se os 70 g de material em uma cápsula e homogeneiza-se com adição de água, aos poucos, até resultar massa plástica.

- Transfere-se parte da massa plástica, assim obtida, para a concha do aparelho, moldando-a de modo que, na parte central da concha, apresente uma espessura aproximada de 1 cm.

Com um dos cinzéis, o julgado mais aconselhável para o caso (solo arenoso, siltoso ou argiloso), divide-se a massa do solo contida na concha em duas partes, abrindo-se uma canelura em seu centro, normalmente à articulação da concha.

- Coloca-se a concha no aparelho, procedendo-se, por meio de acionamento da manivela, o golpeamento da concha contra a base do aparelho.

- Golpeia-se à razão de duas voltas por segundo até que as bordas inferiores da canelura se unam em 1 cm de comprimento, sendo registrado o número de golpes e retirada uma pequena quantidade de solo no ponto onde a canelura fechou, para determinação do teor de umidade conforme a Imagem 4.

#### **Imagem 4:** Ensaio de limite de liquidez



Fonte: O Autor, (2015)

#### **3.6.6. Limite de plasticidade**

O ensaio do limite de plasticidade é realizado com uma fração da amostra representativa do solo que passa na peneira de 0,42mm de abertura de malha (peneira nº 40). A quantidade de material necessária para o ensaio é de cerca de 50g.

- A amostra é colocada em uma cápsula e homogeneizada com adição de água aos poucos, até resultar massa plástica.

- Com uma quantidade de massa plástica obtida, forma-se uma pequena bola, que será rolada sobre uma placa de vidro esmerilhada com pressão suficiente da mão, de modo a resultar a forma de cilindro.

- Quando este atingir a 3mm (verificado com o cilindro de comparação) sem se fragmentar, amassa-se o material e procede-se como anteriormente.

- Repete-se a operação até que, por perda de umidade, o cilindro se fragmenta quando atingir 3 mm de diâmetro.

- Transfere-se alguns pedaços do cilindro fragmentado para um recipiente e determina-se a umidade em estufa à temperatura de 105 °C - 110°C conforme Imagem 5.

**Imagem 5:** Amostras separadas para secagem em estufa



Fonte: O Autor, (2015)

- Repete-se o procedimento acima referido até serem obtidos 3 valores que não difiram da respectiva média de mais de 5%.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão dispostos os resultados e análises da caracterização física dos materiais recicláveis propostos na metodologia por meio de tabelas e gráficos para uma melhor visualização dos mesmos.

### 4.1. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO COM ADIÇÃO

Os ensaios granulométricos foram realizados de acordo com as normas DNER-ME080/94 e DNIT-ME 083/98, os resultados serão analisados e classificados posteriormente. A tabela 2 apresenta a distribuição de 100% do solo natural, a tabela 3 o solo com adição de 20% de MF, a tabela 4 o solo com adição de 40% de MF e a tabela 5 com adição de 70% do MF.

**Tabela 2:** Distribuição granulométrica do material com 100% do solo natural.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA						DNER-ME 080/94				
Peneiramento Grosso					Para N > 5x10 <sup>6</sup> DNER- ES 303/97					
Peneiras		Peso da Amostra Seca g		% que passa	#	Faixa DNIT		Faixa de Trabalho		
Nº	mm	Retido	Passado	Passa	pol.	% passando				
2"	50		1.000,0	100,0	2,0	100,0	100,0	93,0	107,0	
1 1/2	38		1.000,0	100,0	-			-	-	
1	25	51,5	948,5	94,9	1,0	75,0	90,0	68,0	97,0	
3/4	19		948,5	94,9	-	-	-	-	-	
3/8	9,5	216,8	731,7	73,2	3/8	40,0	75,0	33,0	82,0	
4	4,8	225,1	506,6	50,7	4	30,0	60,0	25,0	65,0	
10	2,0	202,5	304,1	30,4	10	20,0	45,0	15,0	50,0	
Peneiramento Fino										
1.000,0		Peneiras		Amostra seca em gr.		% que Passa	FAIXA		FAIXA DE	
		Nº	mm	Retido	Passado	Passa	DNIT		TRABALHO	
		10	2,0							
		40	0,42	105,0	199,1	19,9	15,0	30,0	13,0	32,0
		200	0,075	119,8	79,3	7,9	5,0	15,0	3,0	17,0

Fonte: O Autor, (2015)

**Tabela 3:** Distribuição granulométrica do material com 80% do solo natural e 20% MF.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA							DNER-ME 080/94			
Peneiramento Grosso				Para N > 5x10 <sup>6</sup> DNER- ES 303/97						
Peneiras		Peso da Amostra Seca g		% que passa Passa	# pol.	Faixa DNIT % passando		Faixa de Trabalho		
Nº	mm	Retido	Passado							
2"	50		1.000,0	100,0	2,0	100,0	100,0	93,0	107,0	
1 1/2	38		1.000,0	100,0	-	-	-	-	-	
1	25	88,0	912,0	91,2	1,0	75,0	90,0	68,0	97,0	
3/4	19		912,0	91,2	-	-	-	-	-	
3/8	9,5	362,4	549,6	55,0	3/8	40,0	75,0	33,0	82,0	
4	4,8	219,4	330,2	33,0	4	30,0	60,0	25,0	65,0	
10	2,0	106,0	224,2	22,4	10	20,0	45,0	15,0	50,0	
100,0										
Peneiramento Fino										
1.000,0		Peneiras		Amostra seca em gr.		% que Passa	FAIXA	FAIXA DE		
		Nº	mm	Retido	Passado	Passa	DNIT	TRABALHO		
		10	2,0							
		40	0,42	86,4	137,8	13,8	15,0	30,0	13,0	32,0
	1000,0	200	0,075	52,3	85,5	8,5	5,0	15,0	3,0	17,0

Fonte: O Autor, (2015)

**Tabela 4:** Distribuição granulométrica do material com 60% do solo natural e 40% MF.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA							DNER-ME 080/94			
Peneiramento Grosso				Para N > 5x10 <sup>6</sup> DNER- ES 303/97						
Peneiras		Peso da Amostra Seca g		% que passa Passa	# pol.	Faixa DNIT % passando		Faixa de Trabalho		
Nº	mm	Retido	Passado							
2"	50		1.000,0	100,0	2,0	100,0	100,0	93,0	107,0	
1 1/2	38		1.000,0	100,0	-	-	-	-	-	
1	25	93,9	906,1	90,6	1,0	75,0	90,0	68,0	97,0	
3/4	19		906,1	90,6	-	-	-	-	-	
3/8	9,5	319,6	586,5	58,7	3/8	40,0	75,0	33,0	82,0	
4	4,8	112,9	473,6	47,4	4	30,0	60,0	25,0	65,0	
10	2,0	98,3	375,3	37,5	10	20,0	45,0	15,0	50,0	
100,0										
Peneiramento Fino										
1.000,0		Peneiras		Amostra seca em gr.		% que Passa	FAIXA	FAIXA DE		
		Nº	mm	Retido	Passado	Passa	DNIT	TRABALHO		
		10	2,0							
		40	0,42	106,5	268,8	26,9	15,0	30,0	13,0	32,0
	1000,0	200	0,075	124,3	144,5	14,5	5,0	15,0	3,0	17,0

Fonte: O Autor, (2015)

**Tabela 5:** Distribuição granulométrica do material com 30% do solo natural e 70% MF.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA							DNER-ME 080/94			
Peneiramento Grosso				Para N > 5x10 <sup>6</sup> DNER- ES 303/97						
Peneiras		Peso da Amostra Seca g		% que passa Passa	# pol.	Faixa DNIT % passando		Faixa de Trabalho		
Nº	mm	Retido	Passado							
2"	50		1.000,0	100,0	2,0	100,0	100,0	93,0	107,0	
1 1/2	38		1.000,0	100,0	-	-	-	-	-	
1	25	108,3	891,7	89,2	1,0	75,0	90,0	68,0	97,0	
3/4	19		891,7	89,2	-	-	-	-	-	
3/8	9,5	350,6	541,1	54,1	3/8	40,0	75,0	33,0	82,0	
4	4,8	243,9	297,2	29,7	4	30,0	60,0	25,0	65,0	
10	2,0	67,2	230,0	23,0	10	20,0	45,0	15,0	50,0	
100,0										
Peneiramento Fino										
1.000,0		Peneiras		Amostra seca em gr.		% que Passa	FAIXA	FAIXA DE		
		Nº	mm	Retido	Passado	Passa	DNIT	TRABALHO		
		10	2,0							
		40	0,42	78,1	151,9	15,2	15,0	30,0	13,0	32,0
	1000,0	200	0,075	98,6	53,3	5,3	5,0	15,0	3,0	17,0

Fonte: O Autor, (2015)

Examinando as tabelas e gráficos pode-se classificar o material estudado segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos do DNIT, (Figura 24) como sendo o solo natural GC (Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped. areia e argila), as demais porcentagens das misturas do solo com material fresado enquadra-se na faixa do GM ( Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e silte) devido a adição de material fresado.

Analisando os gráficos os pontos inseridos na curva granulométrica apresentou disparidade entre seu resultado, isso ocorreu devido ao processo de fresagem do material que é realizado de maneira descontínua, os respectivos gráficos serão apresentados no apêndice.

Segundo ao (DNIT, 2006) o material reciclado também atende aos critérios de que o percentual que passa na peneira nº 200 deve ser inferior a 2/3 da fração que passa na peneira nº 40. Nele consta também que o material deve se enquadrar em umas das faixas passantes conforme a tabela 6, tais materiais encaixa-se na faixa B para número  $N > 5 \times 10^6$ .

**Figura 24:** Sistema Unificado de Classificação de Solos

<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA:</b> mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped. areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
<b>SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA:</b> 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com $LL \leq 50$	ML	Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.	
		OL	Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
	SILTES e ARGILAS com $LL > 50$	MH	Siltos - Areias finas ou siltos micáceos - Siltos elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

Fonte: DNIT, (2006)

**Tabela 6:** Tabela de graduações granulométricas

DNER-ES 303/97

p. 03/07

Tipos	Para N > 5 X 10 <sup>6</sup>				Para N < 5 X 10 <sup>6</sup>		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNER, (1997)

Segue abaixo a tabela 7 com as distribuições dos pesos específicos de cada amostra, demonstrando que devido a adição de material fresado as partículas tendem a ficar mais pesadas de acordo com a composição do material.

**Tabela 7:** Peso específico das amostras

<b>PESO ESPECÍFICO</b>	
<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>PESO ESPECÍFICO <math>\gamma</math>(g/cm<sup>3</sup>)</b>
100% CASCALHO	2,51
80% CASCALHO / 20% MF	2,58
60% CASCALHO / 40% MF	2,67
30% CASCALHO / 70% MF	2,72

Fonte: O Autor, (2015)

#### 4.2. CLASSIFICAÇÃO DO CBR OU ISC

Os ensaios do Índice de Suporte Califórnia (CBR) foi realizado conforme preconiza a norma do DNER-ME049/94, que delimita os métodos e parâmetros para encontrar os resultados do ISC, conforme a tabela 8.

**Tabela 8:** Resultados do CBR / Expansão

ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA				
CBR / EXPANSÃO				
DESCRIÇÃO	CBR (%)	EXPANSÃO (%)	ÚMIDADE ÓTIMA (%)	APLICAÇÃO
100% CASCALHO	28,30	0,44	8,30	SUB-BASE
80% CASCALHO / 20% MF	42,50	0,09	8,90	SUB-BASE
60% CASCALHO / 40% MF	66,40	0,09	11,10	BASE
30% CASCALHO / 70% MF	75,30	0,04	11,70	BASE
100% MF	82,80	0,00	7,40	BASE

Fonte: O Autor, (2015)

Verificando os resultados obtidos do CBR, observou-se que houve um aumento da resistência do solo conforme a adição do material fresado ao solo natural que representa em média 27% nas proporções adicionadas.

A classificação do material para qual tipo de camada ele será aplicado foi realizada conforme DNIT (2006), tendo o valor de CBR e a porcentagem de expansão do material determinados, poderá ser classificado pelas seguintes características por camada do pavimento:

- O material do subleito deve apresentar expansão menor igual a 2% e CBR maior igual a 2%;
- O material do reforço do subleito deve apresentar CBR maior que o do subleito, e expansão menor igual a 1%;
- O material para sub-base deve apresentar CBR maior igual a 20%, e expansão menor igual a 1%;
- O material para base deve apresentar CBR maior igual a 80% quando o número N for maior que  $5 \times 10^6$  ou CBR maior igual a 60% quando o número N for menor ou igual a  $5 \times 10^6$  deve apresentar também expansão menor igual a 0,5%.

Portanto a amostra com 100% de cascalho pode ser utilizada para reforço de subleito e sub-base assim como o corpo de prova que compõe 80% de cascalho. Já à amostra com 40% de material fresado pode constituir a camada de base desde que o número N for menor ou igual  $5 \times 10^6$ , onde à amostra com 70% de fresado também enquadra-se nesta característica, podendo então ser empregada em pavimentação flexível urbana, obedecendo também aos critérios de expansão que foi de 0,09% e 0,04% respectivamente.

Realizou-se o ensaio afim de comparação com corpo de prova 09 que constitui 100% de material fresado que atingiu um ISC de 82,80% ideal para aplicação em base com o número N maior que  $5 \times 10^6$ , mas devido a suas composição ser de apenas material reciclado não seria teria viabilidade econômica e quantitativa a sua utilização.

Observou-se que o comportamento do material reciclado e bem característico, pois conforme foi adicionando o MF pode-se constatar que a resistência aumentou chegando próximo ao CBR ideal para um número de repetições do eixo padrão, durante o período do projeto número N for maior  $5 \times 10^6$  recomendado para rodovias de grande fluxo.

#### 4.3. CLASSIFICAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram desenvolvidos de acordo com as normas DNER-ME122/94 e DNER-ME082/94 respectivamente, que determina os procedimentos para obtenção dos resultados apresentados na tabela 9.

**Tabela 9:** Resultados do limite de liquidez e plasticidade

<b>LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE</b>			
<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>L. LIQUIDEZ (%)</b>	<b>L. PLASTICIDADE (%)</b>	<b>ÍND. PLASTICIDADE (%)</b>
100% CASCALHO	24,30	18,10	6,20
80% CASCALHO / 20% MF	19,70	NP	0,00
60% CASCALHO / 40% MF	18,20	NP	0,00
30% CASCALHO / 70% MF	17,80	NP	0,00

Fonte: O Autor, (2015)

A classificação do material conforme seu índice para qual tipo de camada ele será aplicado foi realizada conforme DNIT (2006), que descreve o limite de liquidez seja igual ou inferior a 25% e/ou índice de plasticidade seja igual ou inferior a 6% o material pode ser empregado em base obedecendo os demais critérios já estabelecidos.

Então o material que constitui 100% de cascalho não pode ser empregado em base, porque seu índice de plasticidade e igual a 6,20% não atendendo a norma anterior. Os demais materiais ensaiados apresentam quanto ao limite de plasticidade NP (não plástico), o que expressa que os materiais não puderam ser determinados, isso se deve pela constituição do material fresado com resquício de CBUQ envolto em brita, quando misturados ao solo natural torna-se um solo arenoso.

#### 4.4. BENEFÍCIOS AMBIENTAIS

A preocupação com o meio ambiente e uma das prioridades que deve ser incrementada no plano de ação de um empresa seja ela pública ou privada, o armazenamento inadequado de material fresado sem nenhuma utilização pode trazer uma série de malefícios ao meio ambiente que poderá ser evitado com a reutilização de tal material.

Um dos impactos causado pelo armazenamento inadequado do MF e a contaminação de águas superficiais, tal material é constituído por resquícios de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) proveniente do petróleo e outros óleos lubrificantes, chegando até o esgoto ou afluentes que por ventura estejam próximo ao local de armazenamento. A contaminação do esgoto gera maiores custos para o tratamento do mesmo, sendo assim a empresa responsável por tal tratamento acaba repassando os ônus para os consumidores.

Outro ponto importante do reaproveitamento para o meio ambiente é que a nova técnica apresentada poderá gerar menor exploração de novas jazidas. Os novos veios de material adequado para pavimentação requer investimentos como investigações geológica e geotécnica, custos com transporte e maquinário e mão de obra especializada para tal função além do desmatamento gerado pela retirada do insumo.

Portanto a retirada do material fresado do meio ambiente traz benefício econômico e principalmente ambiental, pois os ganhos não são apenas para a empresa que trabalha no ramo, mas também para toda a comunidade ao seu redor.

## 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho consistiu em apresentar novas opções de estabilização granulométrica para base e sub-base com a reutilização do material fresado como mistura para solos de jazidas sem viabilidade técnica, análise essa feita por meio de ensaio em laboratório comparando com as normas vigentes, pode-se chegar as seguintes conclusões.

- a) Todas as propoções ensaiadas se enquadraram na faixa B conforme a classificação granulométrica descrita pelo DNIT para um número de repetições de eixo-padrão, durante o período de projeto  $N > 5 \times 10^6$ , analisando os gráficos as amostras tiveram seus resultados descontínuo, devido o material ser proveniente em parte da fresagem pavimento antigo, mas atenderam aos critérios de que o percentual que passa na peneira n° 200 deve ser inferior a 2/3 da fração que passa na peneira n° 40;
- b) Analisando os ensaios de CBR e Expansão, observou-se que conforme a adição do material fresado o suporte ao cisalhamento aumentou consideravelmente chegando a 75,30% e expansão de 0,04% na mistura que constituiu 30% cascalho e 70% de material fresado, ideal para utilização em camada de base de pavimento flexível urbano com número  $N \leq 5 \times 10^6$  atendendo também a uma expansão menor que 0,5% de acordo com o DNIT. Característica semelhante adquiriu a amostra com 40% cascalho e 60% material fresado que atingiu 66,40% de CBR e expansão de 0,09%. As demais misturas podem ser utilizadas em sub-base e reforço de subleito este último o CBR deve ser maior que o do próprio subleito e expansão menor que 1%.
- c) Observou-se também quanto ao limite de liquidez todos as corpos de prova não atingiram o limite máximo que é de 25% sendo aceito neste critério, quanto ao índice de plasticidade a amostra com 100% de cascalho ultrapassou o limite de 6% estabelecido por norma do DNIT assim como seu limite de plasticidade que foi de 18,10%. As demais misturas foram classificadas como NP (não plástico) não podendo ser determinado devido ao material ser granulométrico.

No âmbito ambiental o reaproveitamento do material fresado proveniente da técnica de reciclagem a frio “*in situ*” de pavimento flexível servindo como mistura para base e sub-base, traz diversos benefícios devido ao reaproveitamento das camadas de materiais existentes para a construção de um novo pavimento. Evita-se a exploração excessiva de jazidas minerais

e a energia utilizada para a fabricação de novos materiais para a construção de novas camadas sem reaproveitamento, elimina-se o armazenamento e a contaminação devido à retirada de materiais do pavimento, gerando vantagens ambientais podendo ser economicamente viável.

Além do que, a técnica de reciclagem do pavimento diminui gastos com transporte de novos materiais e ocasiona uma menor degradação das estradas. A possibilidade de liberar o tráfego em um tempo menor durante os serviços reduz os prazos de execução da obra, garantindo desta forma a redução dos custos em relação à restauração convencional.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se mencionar:

- Explorar os custo-benefício da aplicação do material reciclado quando comparado ao método tradicional de emprego de novas jazidas;
- Quantificar as possíveis contaminações do solo ou águas superficiais próximo aos locais de armazenamento;
- Realizar os ensaios de índice de grupo, equivalente de areia e resiliência do solo no material reciclado e verificar o atendimento aos critérios de norma;
- Analisar o comportamento do pavimento após o período estipulado de projeto, se atendeu as avaliações funcionais e estruturais exigido por norma.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERNAZ, C. A. V. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir de bacia de deflexão**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1997.
- ALKINS, A.; LANE, B.; KAZMIEROWSKI, T. **Sustainable Pavements- Environmental, Economic and Social Benefits of In-Situ Pavement Recycling**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Canada. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Análise granulométrica**. ABNT/MB 7181. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Geossintéticos — Ensaio de punçomameno estático (punção CBR)**. ABNT/NBR ISO 12236:2013. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Peneira de ensaio e ensaio de peneiramento**. NM-ISO 2395:1996. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Índice de suporte califórnia – Método de ensaio**. ABNT/MB 9895:1987. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1988.
- AZEVEDO, M. -. **Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos**. INIR. Lisboa. 2009b.
- BALBO, J. T. **Patologias e Manutenção**. São Paulo: Plêiade, 2007.
- BARIANI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica, Formação básica para engenheiros**. 3ª Reimpressão. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.
- BARROS, R. F. **Utilização do revestimento fresado da BR-104, como Material de Reforço da Camada de Base e/ou Sub-base**. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2013.
- BATISTA, F. A.; ANTUNES, M. **Reciclagem de Pavimentos Utilizando Ligantes Betuminosos**. 2ª Jornadas Cepsa Betumes. Lisboa. 2009.
- BERNUCCI, L. B. **Pavimentação Básica**. Rio de Janeiro: Universidade Petrobrás. 2008.
- BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª edição. ed. São Paulo: [s.n.], 2007.
- C.N.T. **Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte de Rodovias**. Brasília. 2014.
- COSTA - BAPTISTA, A. M. **Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central - Contribuição para o seu Estudo e Aplicação**. Departamento de Engenharia Civil – F.C.T.U.C. Coimbra. 2006.

- CUNHA, C. M. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem**. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA. LISBOA, p. 92. 2010.
- DAVID, D. D. **Misstras asfálticas recicladas a frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 117. 2006.
- DEFENSE, U. S. D. O. D. **Standard Practice Manual for Flexible Pavements**. USA. 2001.
- DNER-ES 303. **Pavimentação - base estabilizada granulometricamente**. [S.l.]. 1997.
- DNER-ME 080. **Solos - análise granulométrica por peneiramento**. [S.l.]. 1994.
- DNER-ME 082. **Solos - determinação do limite de plasticidade**. [S.l.]: [s.n.], 1994.
- DNER-ME 083. **Agregados - análise granulométrica**. [S.l.]: [s.n.], 1998.
- DNER-ME 122. **Solos - determinação do limite de liquidez**. [S.l.]: [s.n.], 1994.
- DNER-ME 049. **Solos - determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1994.
- DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.
- DNIT, D. N. I. T. **Pavimentação - Base Estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Espirito Santo: [s.n.], 141/2010.
- ENGENHARIA, C. **Projeto Executivo de Engenharia para Obras de Recuperação e Manutenção de Rodovias**. Mato Grosso do Sul. 2010.
- FONSECA, P. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários**. RECIPAV, Cartaxo. [S.l.]. 2002.
- M. B. et al. dossiê logística. **Globo Rural**. Disponível em:  
<<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,ERT318051-18283,00.html>>. Acesso em: 01 Maio 2015.
- MARTEC. Martec, 2009. Disponível em:  
<[http://www.martec.ca/technology/asphalt\\_recycling\\_techniques.htm](http://www.martec.ca/technology/asphalt_recycling_techniques.htm)>. Acesso em: 18 Abril 2015.
- MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. 1ª Edição. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997.
- OLIVEIRA, M. D. D. **UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM PAVIMENTAÇÃO**. Universidade Federal de Santa Catarina. FLORIANÓPOLIS, p. 116. 2014.
- PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD. **Pavement design and materials**. New Jersey, p. 542. 2008.

PICADO-SANTOS, L.; BAPTISTA, A. M. **Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas a quente.** [S.l.]. 2008.

SEIXAS, P. **Reciclagem de Pavimentos com Espuma de Betume – Uma Experiência a Grande Altitude.** Mota-Engil, Pavimentações, S.A. Cordilheira dos Andes, Peru. 2008.

SILVA, C. F. S. C. E. **REUTILIZAÇÃO DO RESÍDUO ORIUNDO DOS SERVIÇOS DE RESTAURAÇÃO ASFÁLTICA COMO MATERIAL ALTERNATIVO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.** Ijuí. 2012.

VICENTE, A. M. **A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis.** Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2006.

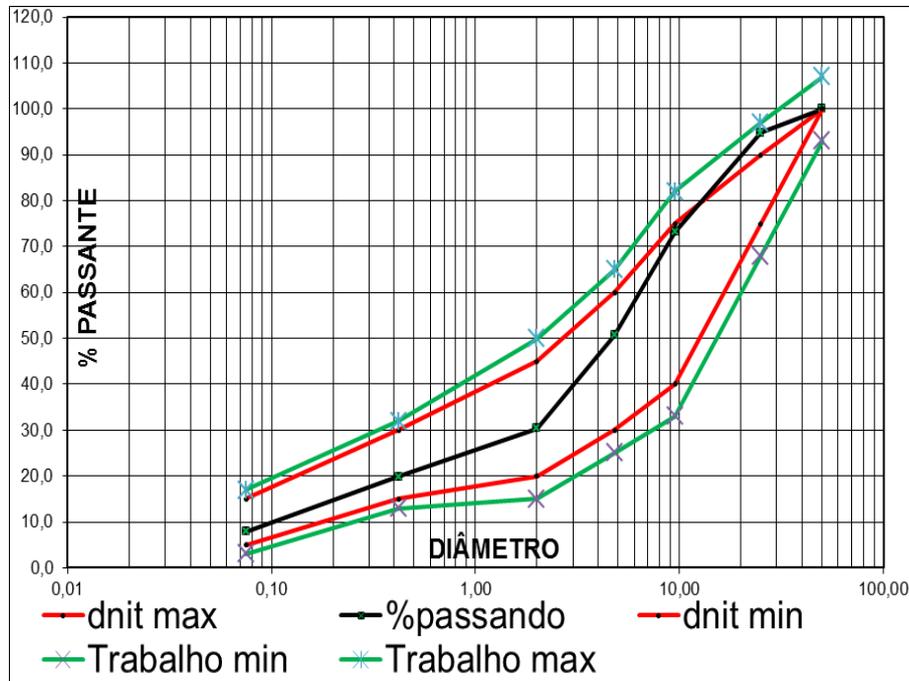
WIRTGEN, 2009. Disponível em: <<http://www.wirtgen.de/en.>>. Acesso em: 18 Abril 2015.

WIRTGEN GROUP. Reciclagem de pavimentos em obras do Brasil. **Usina de Notícias,** 2010.

## APÊNDICE

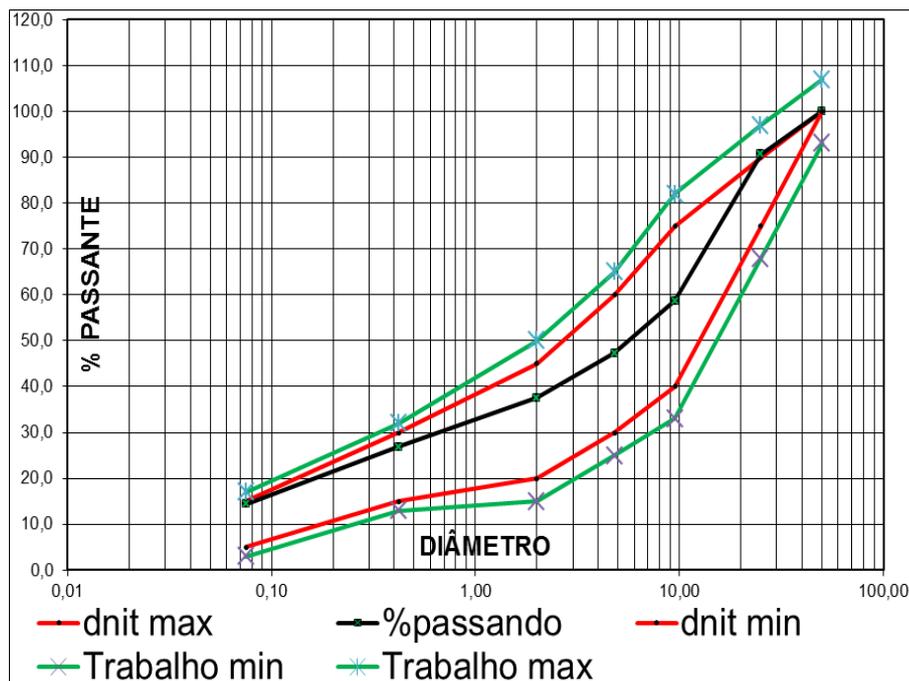
### APÊNDICE A – Gráficos do ensaio de granulometria

**Gráfico 1:** Granulométrica do material com 100 % do solo natural.



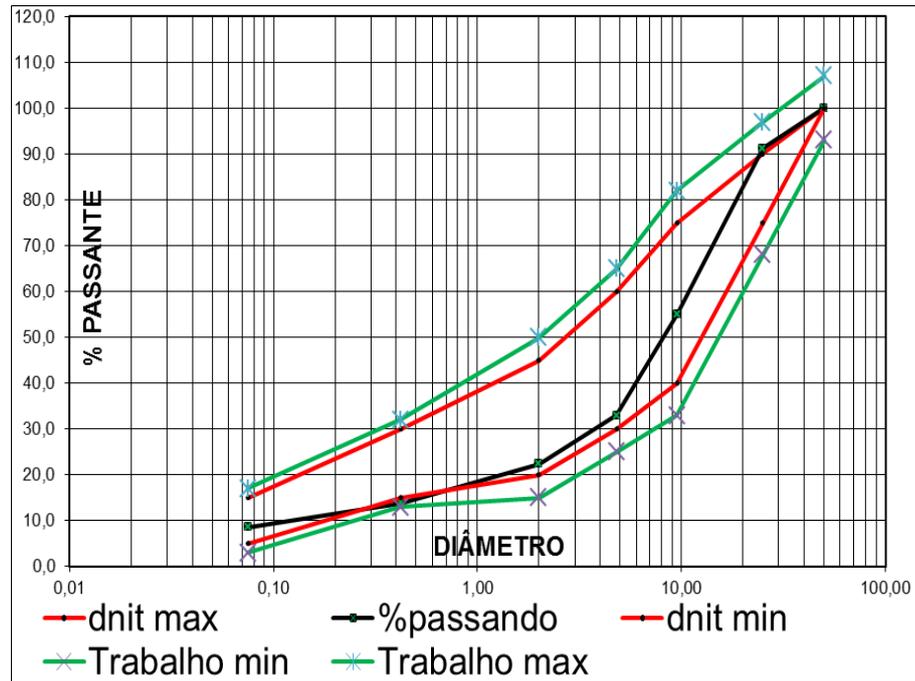
Fonte: O Autor, (2015)

**Gráfico 2:** Granulométrica do material com 80 % do solo natural e 20 % MF.



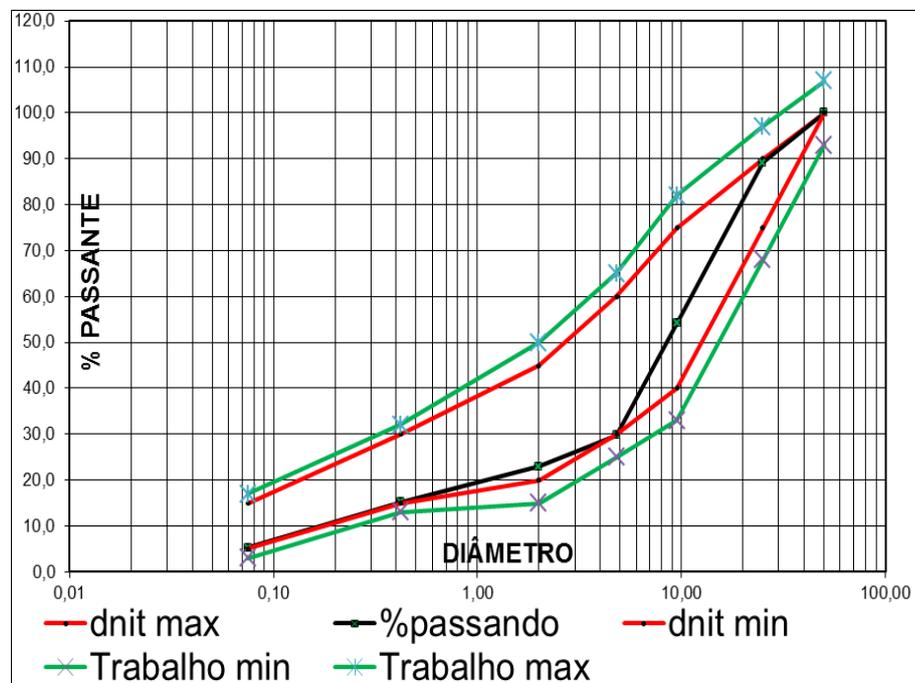
Fonte: O Autor, (2015)

**Gráfico 3:** Granulométrica do material com 60 % do solo natural e 40 % MF.



Fonte: O Autor, (2015)

**Gráfico 4:** Granulométrica do material com 30 % do solo natural e 70 % MF.



Fonte: O Autor, (2015)