

**REDE DE ENSINO DOCTUM  
UNIDADE JOÃO MONLEVADE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Fernanda Dos Santos Teixeira  
Jéssica Ercília Meira**

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EM CAMADAS DE  
SUB-BASE: ESTUDO DE CASO BR-381**

**JOÃO MONLEVADE**

**2018**

**Fernanda Dos Santos Teixeira**  
**Jéssica Ercília Meira**

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EM CAMADAS DE SUB-BASE:  
ESTUDO DE CASO BR-381**

Trabalho de Conclusão de Curso,  
apresentado para obtenção do grau de  
bacharel em Engenheiro Civil no curso de  
Engenharia Civil, da Faculdade Doctum de  
João Monlevade.

Orientador: Me. Wagner Cavaleire de Souza.

**JOÃO MONLEVADE**

**2018**

Fernanda Dos Santos Teixeira

Jéssica Ercília Meira

**RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EM CAMADAS DE SUB-BASE:  
ESTUDO DE CASO BR-381**

Trabalho de Conclusão de Curso,  
apresentado para obtenção do grau de  
bacharel em Engenharia Civil no curso de  
Engenharia Civil, da Faculdade Doctum do  
João Montevade.

João Montevade, 06 de Dezembro de 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

*Wagner Cavalcante de Souza*

Prof. Wagner Cavalcante de Souza - Mestre - (Rede de Ensino Doctum) - Orientador

*Rafael Vital Jank*

Prof. Rafael Vital Jank - Mestre - (Rede de Ensino Doctum)

*Viviane Dias Andrade*

Prof. Viviane Andrade - Mestre - (Rede de Ensino Doctum)

*Dedicado a nossos pais, irmãos, e a toda nossa família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que chegássemos a vencer esta etapa, aos mestres que com toda dedicação nos encaminharam durante a execução de todo o trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter estar sempre ao nosso lado nos momentos mais difíceis.

Aos nossos pais e amigos, pelo apoio, carinho e admiração e amor incondicionais em todos os momentos.

Ao orientador Wagner Cavallare de Souza, pelos ensinamentos, correções e conhecimento que sem eles, este trabalho não teria sido possível.

Aos engenheiros Giuliano Palmieri e Norberto Rodrigues dos Santos pela colaboração, pelo tempo disponibilizado e espaço cedido.

À Rede Doctum de Ensino, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que permitiu que vislumbrássemos a ética, o caráter e o mérito.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o nosso muito obrigado.

Com certeza, se conseguimos ver mais longe, foi por estarmos em ombros de gigantes.

## RESUMO

Atualmente o calçamento das vias urbanas tem sido discutido em diversos estudos, por fazer parte de diversos cronogramas de execução. A principal função estrutural da pavimentação asfáltica é resistir grandes pressões sofridas devido ao fluxo intenso do tráfego proporcionando uma melhor condição de rolamento. O estudo se deu por observação da obra com reciclagem de pavimento de sub-base em trechos da BR 381 em Minas Gerais. O revestimento, considerado a mais importante camada constituinte da pavimentação, utilizados em concreto betuminoso usinado e quente e em tratamentos superficiais, possuindo cada um de acordo com suas características, variações e propriedade físicas. A reciclagem do pavimento se mostra viável economicamente, mas principalmente ambientalmente, pois o despejo inadequado de resíduos da construção civil é um dos meios mais poluentes pelo seu grande volume de produção. Tendo o presente estudo o objetivo de mostrar as etapas de reciclagem e o levantamento de ensaios técnicos realizados antes da obra, além de busca por material com referencial teórico. Após o estudo os resultados mostraram que é possível que seja feita a reciclagem de forma segura. Conclui-se que a pavimentação tem seu tempo de duração que pode variar com intempéries e a carga que nela é aplicada, isso pode acarretar patologias prematuras, a reciclagem vem como forma financeira e ambientalmente correta de sanar os problemas aparentes.

**Palavras-chaves:** Pavimentação asfáltica. Reciclagem. Ensaios. BR 381.

## **ABSTRACT**

Currently, the paving of urban roads has been discussed in several studies, to be a part of several timelines for implementation. The main structural function of asphalt paving is to resist great pressures suffered due to the intense flow of traffic by providing a better condition of bearing. The study took place by observation of the work with recycling of pavement sub-base in stretches of the BR 381 in Minas Gerais. The coating, considered the most important constituent layer of concrete paving, used in shale machined and hot and in surface treatments, each according to their characteristics, variations and physical property. The recycling of pavement is economically viable, environmentally, but mainly because the improper eviction of civil construction waste is one of the most polluting means by their large volume of production. The present study aimed to show the steps of recycling and the lifting of technical tests carried out before the work, in addition to searching for material with theoretical. After the study results showed that it is possible to be recycled safely. It concludes that the paving has its duration time of which can vary with weather and the charge that it is applied, this can cause premature pathologies, recycling comes as financial and environmentally correct way to reconcile the apparent problems.

**Keywords:** Asphalt Paving. Recycling. Tests. BR 381

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BR	Brasil Rodovia
NBR	Norma Brasileira Registrada
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
PMRJ	Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro
RS	Resistentes aos Sulfatos

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Consumo de Asfalto no Brasil entre 2000 e 2009 .....	16
Figura 2- Pavimentação nas Rodovias do Brasil em 2014. ....	17
Figura 3- Trechos Duplicados da BR-381 .....	18
Figura 4- Camadas do Pavimento .....	20
Figura 5- Concreto de Cimento Portland .....	22
Figura 6- Concreto Simples .....	23
Figura 7- Asfalto Tipo Whitetopping .....	24
Figura 8- Espaçador Caranguejo .....	25
Figura 9- Espaçador Soldado .....	25
Figura 10- Concreto Rolado .....	26
Figura 11- Pavimento Pré Moldado .....	27
Figura 12- Pavimento Sobre- Laje em Tabuleiro de Obras Especiais .....	29
Figura 13- Pavimento Flexível (Corte Transversal) .....	30
Figura 14- Tipos de Materiais Usado Para Camadas Do Pavimento Flexível .....	31
Figura 15- Benefícios Relacionados a Reciclagem de Pavimento Flexível .....	33
Figura 16- Distribuição de Carga nos Pavimentos .....	33
Figura 17- Fatores Prejudiciais ao Asfalto .....	34
Figura 18- Possibilidades de Reciclagem Asfáltica .....	36
Figura 19- Trecho da BR-381 .....	41
Figura 20- Trecho da BR-381 em Minas Gerais .....	41
Figura 21- Fases do Reaproveitamento do Pavimento Existente .....	42
Figura 22- Vista Geral da Execução da Camada de Reciclados .....	43
Figura 23- Espalhamento dos Reciclados com Cimento .....	44
Figura 24- Vista geral da Compactação da Camada .....	44
Figura 25- Corpo de Prova ( Reciclado com Cimento) .....	45
Figura 26- Execução da Pintura contra Evaporação de Água .....	46
Figura 27- Disco Espaçador de Metal .....	47
Figura 28- Soquete de Metal Cilíndrico .....	47
Figura 29- Ferramentas Utilizadas para Ensaio de Grau de Compactação .....	50
Figura 30- Frasco com Areia e Funil .....	51
Figura 31- Pesagem do Material na Balança .....	51

Figura 32- Realização da Escavação com Bandeja de Furo no Centro. ....	53
Figura 33- Profundidade da Escavação .....	53
Figura 34- Viga Benkelman e Caminhão de Roda Dupla.....	54
Figura 35 - Montagem dos Equipamentos para Ensaio de Recalque .....	56
Figura 36- Equipamentos para Ensaio de Recalque .....	57
Figura 37- Utilização do Macaco Hidráulico .....	57

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 Objetivos Gerais .....	15
2.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
3.1 Aspectos Históricos .....	16
<b>3.1.1 Breve histórico da Pavimentação</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1.2 Breve Histórico da BR 381</b> .....	<b>17</b>
3.2 Conceitos De Pavimento .....	18
3.3 Pavimentos Rígidos .....	20
<b>3.3.1 Pavimento de Concreto Simples</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3.2 Pavimento tipo Whitetopping ou Cobertura Branca</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3.3 Pavimento Estruturalmente Armado</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3.4 Pavimento de Concreto Rolado</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3.5 Pavimentos com Peças Pré-Moldadas</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3.6 Pavimento Sobre-Laje em Tabuleiros de Obras de Arte Especiais</b> .....	<b>28</b>
3.4 Pavimentos Flexíveis .....	29
3.5 Pavimento Rígido X Pavimento Flexível .....	33
3.6 Reciclagem do Pavimento .....	34
<b>3.6.1 Reciclagem á Quente</b> .....	<b>36</b>
<b>3.6.2 Reciclagem á Frio</b> .....	<b>37</b>
3.7 Estudos Realizados .....	37
<b>3.7.1 Ensaio Realizado <i>In Loco</i></b> .....	<b>37</b>
<b>3.7.2 Ensaio Realizado em Laboratório</b> .....	<b>39</b>
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>40</b>

4.1 Delineamento da Pesquisa.....	40
4.2 Características Gerais da BR-381 .....	40
4.3 Procedimentos Técnicos Iniciais do Pavimento Existente .....	42
4.4 Execução do Trecho Experimental.....	43
4.5 Ensaios de Laboratório.....	46
4.6 Ensaios “In Loco” .....	49
<b>4.6.1 Grau de Compactação (Frasco de Areia) .....</b>	<b>49</b>
<b>4.6.2 Viga Benkelman.....</b>	<b>53</b>
<b>4.6.3 Ensaios de Carga com Placa (Cálculo de Recalque) .....</b>	<b>55</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCURSSÕES .....</b>	<b>59</b>
5.1 Ensaio de Compactação (Proctor).....	59
5.2 Grau de Compactação (Frasco de Areia).....	60
5.3 Viga Benkelman .....	62
5.4 Ensaios de Carga com Placa (Cálculo de Recalque) .....	61
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente são adotados processos de fresagem do asfalto, essa operação consiste no corte ou desbaste por movimentos rotativos, retirando assim uma ou mais camadas do pavimento asfáltico por meio de processo mecânico a quente ou a frio. A problemática aparente desse processo é a quantidade de resíduos sólidos gerados. (FILHO, 2009).

Segundo Hilário (2016) no que se diz a respeito ao sistema de transporte brasileiro, é possível notar uma extensa matriz rodoviária, com uma malha de 213.299 km de rodovias pavimentadas. As rodovias são o principal meio de movimentação de pessoas e produtos no Brasil, contemplando cerca de 61% do total de transporte de produtos, seguido de longe pelo transporte ferroviário com 20,7%, aquaviário por 13,6%, dutoviário por 4,2% e por fim o aéreo, que atende por 0,4% do transporte de cargas no país. Em relação ao transporte de passageiros, a diferença é ainda maior, ficando com o modal rodoviário responsável por aproximadamente 95% do transporte de pessoas.

De acordo com Alvim (1999) apud Filho (2009), no Brasil a reciclagem dos resíduos provindos do processo de fresagem só começou na década de 70 no estado de São Paulo.

Com o acelerado aumento da população visa-se a necessidade de que haja um controle bem acentuado com relação ao aumento de resíduos, o volume produzido no processo de fresagem é grande, com isso há uma necessidade de reutilização desses para que o impacto ambiental gerado seja o menor possível e fundamentado na sustentabilidade, isso ocorre pelo fato de não ocorrer a disposição final inadequada dos resíduos e tampouco a exploração de fontes naturais para a produção de mais matéria prima.

A superfície do pavimento asfáltico é uma estrutura planejada para resistir aos esforços gerados pelo tráfego, ele é composto por agregado mineral, subproduto do petróleo, mistura de rocha de qualidade e areia. Visando a escassez de matéria prima e redução de custos, torna-se cada vez mais viável a utilização de técnicas para recuperação como reciclagem ou recapeamento, entretanto, as técnicas não são realizadas caso o pavimento esteja totalmente degradado. A reciclagem de pavimentos consiste na reutilização de todo o material existente na via danificada

para reestruturação do pavimento, pode-se adicionar materiais como agentes estabilizantes para que haja o reforço na estrutura final. (GEWEHR, 2014 apud DEMUELENAERE; SANTOS, 2018).

O presente projeto de pesquisa apresentará a reciclagem como um processo necessário para melhorar o enfrentamento da crise do setor rodoviário, em especial na pavimentação de rodovias e estradas no Brasil. Será feito um estudo de caso na BR 381, utilizando-se da técnica de reaproveitamento de concreto betuminoso (pavimento flexível/asfalto) para a fabricação da nova estrutura em concreto rígido.

Com a perspectiva de amenizar os impactos relacionados ao volume descartado dos materiais inertes no meio ambiente e com intuito de apresentar uma alternativa sustentável de baixo custo, serão discorridos neste trabalho os benefícios que podem ser alcançados com o uso de material descartado no processo de fresagem de pavimentos asfálticos, bem como a análise de caso envolvendo a mencionada rodovia.

## 2 OBJETIVOS

A relevância do trabalho acadêmico aqui apresentado se fundamenta em traçar objetivos gerais e específicos para obter-se resultados com elevado valor no âmbito de pesquisas e ensaios técnicos e laboratoriais.

### 2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral do trabalho é analisar os impactos ambientais causados pelo descarte de material em áreas de bota-fora e iniciar um projeto de restauração de pavimento empregando a técnica de reciclagem, com incorporação de cimento Portland, realizada pelo consórcio juntamente com o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), na BR 381.

### 2.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar as principais características dos pavimentos flexíveis e rígidos;
- b) Analisar os benefícios que podem ser alcançados com o uso de material descartado no processo de reciclagem de pavimentos asfálticos;
- c) Expor as vantagens econômicas e ambientais de aplicabilidades resíduos reciclados.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Aspectos Históricos

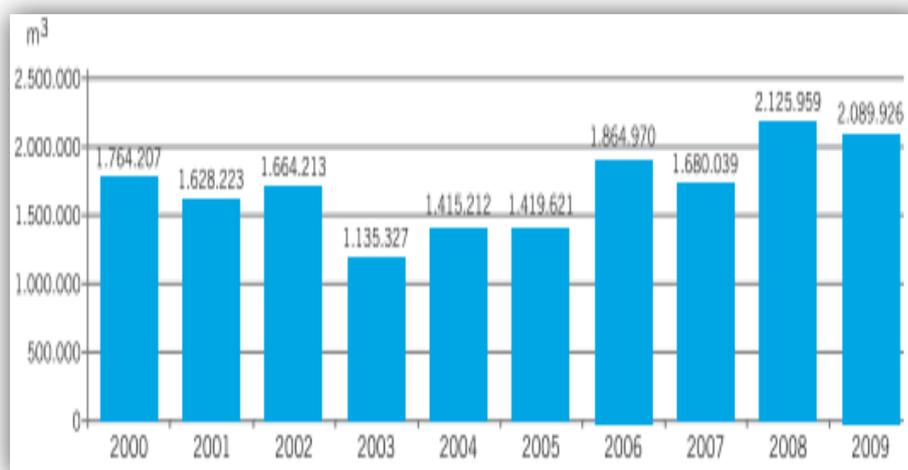
##### 3.1.1 Breve histórico da Pavimentação

A história da pavimentação é tão antiga que há bastante divergência sobre quando e onde se iniciou, alguns estudiosos apresentam pesquisas que mostram que a pavimentação estava presente antes de Cristo (A.C), outros estudiosos apresentam histórias onde os incas foram responsáveis pela criação da pavimentação por volta do ano 1400.

Os estudos relacionados à melhoria desse produto/serviço tem ganhado força devido à necessidade de se obter melhores eficiências e menores custos de construção e manutenção.

A crescente necessidade de pavimentar estradas para facilitar a locomoção de pessoas e de cargas faz com que conseqüentemente aumente o consumo de materiais para a pavimentação. A Figura 1 mostra o consumo de malha asfáltica entre os anos de 2000 e 2009, nota-se que 2008 houve o maior registro desse consumo cerca de 2.125 mil toneladas, marca esta que excedeu o recorde obtido em 1998 de 1.970 mil toneladas. (MOURA, 2014)

Figura 1- Consumo de Asfalto no Brasil entre 2000 e 2009



Fonte: Petrobras apud Moura 2014.

No Brasil o marco histórico foi no ano de 1906 quando ocorreu o calçamento asfáltico em grande escala na cidade do Rio de Janeiro, tal marco ocorreu quando a cidade era governada pelo Prefeito Rodrigues Alves, a situação atual é que depois de muitas décadas o malha asfáltica necessitada de manutenção, por isso milhares de quilômetros estão parcial ou totalmente deteriorados, há uma necessidade urgente de retificar os danos para que não ocorra a perda total do pavimento aplicado.

A Figura 2 apresenta a parcela de rodovias não pavimentadas no Brasil no ano de 2014, juntamente com a porcentagem de rodovias pavimentadas.

Figura 2- Pavimentação nas Rodovias do Brasil em 2014



Fonte: CNT, 2015 apud Zeni, 2016 p.26.

### 3.1.2 Breve Histórico da BR 381

A rodovia 381 também conhecida como Fernão Dias começou a ser construída na década de 50 do século passado, foi inaugurada em 1960 e finalizada em 1961 com o trecho total que liga os Estados de Minas Gerais e São Paulo.

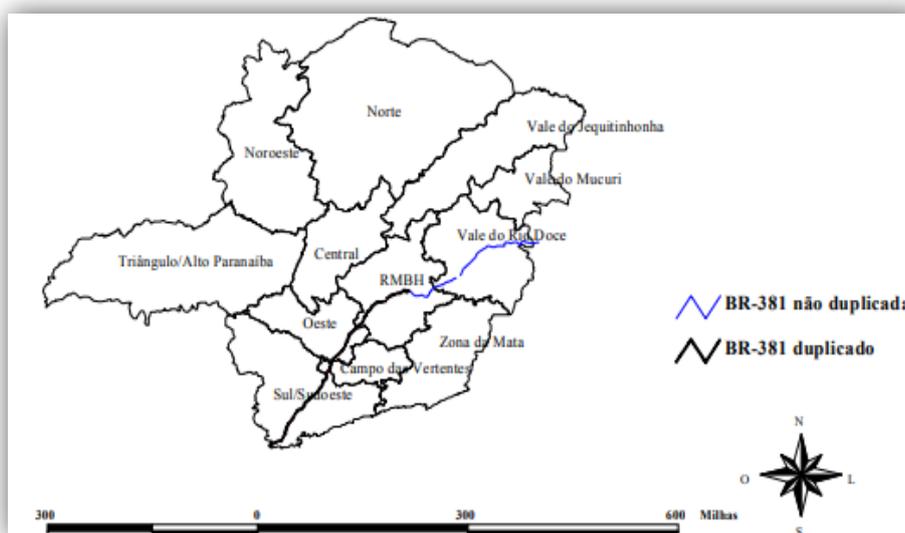
A importância econômica da rodovia para o país pode ser brevemente expressa, como apresentada por Almeida (2004) p. 3:

“A rodovia BR-381 liga duas das mais importantes cidades do País: Belo Horizonte até São Paulo, percorrendo um traçado diagonal numa extensão de 563,2 quilômetros neste trecho. Segundo o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG), 43% da economia mineira, 20% de toda a produção do parque industrial de Minas e de São Paulo, cerca de 60% da produção nacional de ferro-gusa e aproximadamente 3 milhões de toneladas da produção agrícola mineira passam pela BR381, representando uma circulação média de mais de 15 mil veículos – entre ônibus, caminhões e automóveis – por dia. Além disso, 25% da população mineira vivem e trabalham em sua área de influência.”

Com o aumento da demanda de transporte de cargas a malha viária da rodovia necessitou ser duplicada, em 1973 foi apresentado o primeiro projeto de duplicação, desde então há vários projetos, alguns sendo executados, outros parados por falta de verba e ainda aqueles que não foram aprovados por irregularidades ou inviabilidade.

De acordo com Almeida (2004) após muitos anos, ainda há uma parcela do trecho Belo Horizonte- São Paulo da rodovia para serem duplicados. Em decorrência da falta de correta manutenção, existe também a necessidade de restauração de grande parte da rodovia. A Figura 3 apresenta um mapa do estado de Minas Gerais, os trechos da BR- 381 que são simples e os demais duplicados.

Figura 3- Trechos Duplicados da BR-381



Fonte: Almeida, 2004.

### 3.2 Conceitos De Pavimento

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas construída sobre terraplenagem, destinada economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego para melhorar as condições de rolamento, proporcionando condições satisfatórias de conforto e segurança. (SENÇO, 2007)

De acordo com Senço (2007, p.42), é um “sistema de várias camadas de espessuras finitas que se assenta sobre um semi-espaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito”.

As cargas que solicitam um pavimento são transmitidas por meio das rodas pneumáticas dos veículos. “Á área de contato entre os pneus e o pavimento tem a forma praticamente elíptica, e a pressão exercida tem uma distribuição aproximadamente parabólica, com a pressão máxima exercida no centro da área carregada”. (Senço, 2007, p.44).

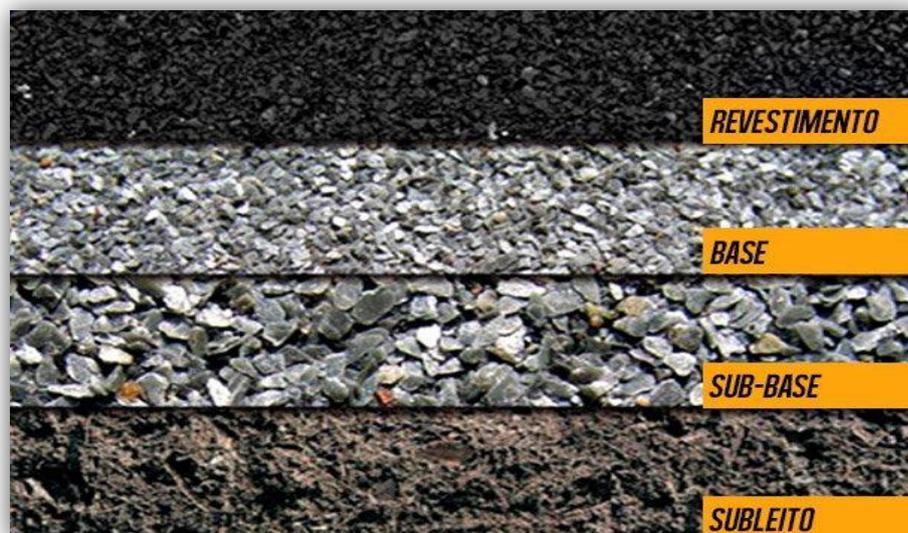
O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento (Bernucci et al 2008). Das estruturas de pavimentos, segundo a rigidez do conjunto, têm-se as estruturas rígidas e, no outro, as flexíveis.

Segundo Balbo (2007, p.11) o pavimento rodoviário é composto pelas seguintes camadas:

- a) “Subleito: é a camada infinita do pavimento, sendo considerada a fundação do pavimento, ou seja, é o material natural da região onde se pretende inserir o pavimento;
- b) Reforço do subleito: é a camada com espessura variável, melhora a capacidade de suporte de carga do subleito, com características técnicas inferior a da camada sub-base, e superior a do material do subleito.
- c) Sub-base: é a camada que possui a mesma função da base, é executada sobre o subleito ou o reforço do subleito;
- d) Base: é a camada de pavimentação destinada a receber os esforços verticais do tráfego e distribuir as camadas subjacentes;
- e) Revestimento: é a camada que recebe cargas verticais e horizontais oriundas do tráfego, transmitindo as camadas subjacentes. Além de melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, e resistir aos desgastes;
- f) Acostamentos: Caracterizados como região contígua da pista de rolamento. É destinada ao estacionamento de veículos em casos de emergência e fornece suporte lateral ao pavimento. Geralmente é executado com materiais inferiores aos utilizados na pista de rolamento”

Pode-se ilustrar as camadas dos pavimentos conforme a Figura 4.

Figura 4- Camadas do Pavimento



Fonte: Flatout, 2018.

### 3.3 Pavimentos Rígidos

Os pavimentos ou estruturas rígidas são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland, apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento, assentada sobre o subleito. As principais características dos pavimentos rígidos são determinadas por três diferentes pontos, sendo o solo, os agregados e o concreto de cimento Portland.

Os solos são parte essencial da construção de um pavimento rígido. Contudo, é necessário o estudo demasiado das características do solo natural na qual a estrutura do pavimento futura vai se apoiar.

Devido ao fato da placa de concreto de cimento Portland suportar a maior parte das tensões originadas pelo tráfego, como cita Senço (2007, p.14), “não irá haver grandes preocupações do ponto de vista de resistência do subleito”.

Como ressalta o DNIT (2005, p.19), “deve ser dado o enfoque especial a variações bruscas nas características do subleito, presença de solos expansivos e camadas de argila mole, para que sejam evitados os problemas já citados de recalque da estrutura”.

Para o dimensionamento dos pavimentos rígidos, o parâmetro relativo ao subleito considerado é o coeficiente de recalque, no qual são correlacionadas as pressões verticais transmitidas por cargas em uma placa rígida com 76 cm (setenta

e seis centímetros) de diâmetro sobre o solo, com a medida das respectivas deformações provocadas.

Têm-se também os solos agregados que são usados do mesmo modo nos pavimentos rígidos. Além de obedecer às características já preconizadas pelas normas que regem as especificações de materiais utilizados para confecção de peças de concreto armado, estes devem obedecer a características específicas para uso na pavimentação, como destaca o DNIT (2005).

Por isso devem ser executados ensaios que visam certificar propriedades como resistência à tração, menor suscetibilidade a variações volumétricas e a fissuração e elevada resistência às intempéries ambientais e aquelas provocadas pelo tráfego.

Por fim, temos o concreto de cimento Portland. É um material essencialmente utilizado na construção das placas que compõem o pavimento rígido (Figura 5). Deve possuir como características principais, resistência característica a flexão da ordem de 4,5 MPa (Mega Pascal) ou nos casos de pavimentos armados deve possuir resistência a compressão axial em torno de 30 MPa, além das preconizadas pelas normas de estrutura em concreto gerais do DNIT.

Contudo, para projetos de liberação rápida ao tráfego, deve-se utilizar a resistência do concreto aos 7 (sete) dias. “Tais situações envolvem o emprego de concretos especiais, denominados fast-track, que permitem a liberação do tráfego com poucas horas após a concretagem, como mostra o DNIT” (2005, p.12).

Entre outras características, o concreto destinado à pavimentação devem apresentar baixos índices de variação volumétrica, trabalhabilidade compatível com o equipamento utilizado e deve ter uma taxa mínima de consumo de cimento de 320 (trezentos e vinte) quilos por metro cúbico de concreto produzido.

Além disso, conforme o DNIT (2005, p.4):

“é recomendável à utilização de aditivos para o concreto empregado na pavimentação. Geralmente são utilizados os plastificantes e aditivos incorporadores de ar. Vale destacar que os aditivos podem influenciar na melhoria das condições de trabalhabilidade, diminuição da retração e da permeabilidade, aumento de resistência e durabilidade do concreto”.

Figura 5- Concreto de Cimento Portland



Fonte: ABCP, 2017.

Ainda se tratando do pavimento rígido, este se subdivide em alguns tipos de malhas ou pavimentos asfálticos, como será mais bem demonstrado nos itens a seguir.

### 3.3.1 Pavimento de Concreto Simples

Pela Norma DNIT 049/2004 - ES – execução de pavimentos determina que o pavimento de concreto simples seja “pavimento cuja camada é constituída por placas de concreto de cimento Portland, não armadas ou eventualmente com armadura sem função estrutural, que desempenham simultaneamente as funções de base e de revestimento”.

Os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. (BENUCCI et al., 2008.).

A fim de melhorar compreensão do que seja o concreto simples, pode-se ilustrar conforme Figura 6.

Figura 6- Concreto Simples



Fonte: Soluções para as Cidades, 2017.

### 3.3.2 Pavimento tipo Whitetopping ou Cobertura Branca

O pavimento de concreto do tipo Whitetopping, também chamado de cobertura branca é um tipo de pavimento destinado ao recapeamento dos pavimentos flexíveis, onde o Whitetopping constitui uma técnica alternativa que vem a se juntar às soluções já disponíveis, possibilitando ampliar a vida de serviço de qualquer tipo de pavimento asfáltico, não importando as condições funcionais e estruturais.

A durabilidade, tecnologia do produto, técnicas modernas e simplificadas de construção e o desempenho em longo prazo entregam ao Whitetopping uma maior competitividade frente aos demais tipos de concreto existentes. (DNIT, 2004).

A Figura 7 exemplifica o que é o pavimento mencionado.

Figura 7- Asfalto Tipo Whitetopping



Fonte: Cimento Itambé, 2016.

Pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2004), a construção do pavimento deste tipo pode ser feito de três formas diferentes, sendo por colocação direta, fresagem ou construção de uma camada de nivelamento. A primeira é precedida de umedecimento da superfície, não sendo exigida qualquer preparação prévia do pavimento construído.

O método de fresagem utiliza-se as trilhas de roda em profundidade maior que 50 mm (milímetros) ou em caso que ocorram ondulações muito acentuadas. Já a construção de uma camada de nivelamento, geralmente é feita por uma mistura betuminosa usinada a quente, sendo esse último método, o de mais elevado custo quando comparado com os três procedimentos disponíveis, além de exigir maior diversidade de equipamento e materiais.

A produção, o transporte, o lançamento, o adensamento, a terminação superficial, a cura e a selagem de juntas do concreto do Whitetopping são idênticos às operações da mesma natureza executadas na construção dos pavimentos tradicionais de concreto (DNIT, 2004).

### 3.3.3 Pavimento Estruturalmente Armado

Os pavimentos estruturalmente armados devem ser revestidos de armaduras para melhor desempenho e durabilidade do pavimento, em especial, para os casos em que seja necessário o combate às fissuras causadas pela retração do concreto.

Nesses procedimentos, a altura da armadura fica sujeita, única e exclusivamente, à perícia, destreza dos operários. As armaduras principais, denominadas telas, devem ser posicionadas de forma a auxiliar os espaçadores apropriados, chamados de caranguejos (Figura 8) e (Figura 9).

Figura 8- Espaçador Caranguejo



Fonte: Maq Blocos, 2015.

Figura 9- Espaçador Soldado



Fonte: Fameth, 2017.

As emendas realizadas nas armaduras devem ser feitas pela superposição de pelo menos uma malha, por atuarem na absorção dos esforços oriundos da retração do concreto.

Como exemplo, os pisos estruturalmente armados devem possuir uma emenda de transposição de pelo menos duas malhas, “quando o diâmetro do fio principal for inferior a 8 mm (milímetros) e para fios maiores, recomenda-se que ela seja superior a 1,5 x 25 cm (centímetros)” (DNIT, 2004, p.97).

### 3.3.4 Pavimento de Concreto Rolado

De acordo com a normalização do DNIT, o concreto rolado ou concreto pobre (Figura 10) é um concreto seco de consistência rija e trabalhabilidade tal que lhe permite ser compactado por rolos compressores, vibratórios ou não, em lugar de ser adensado por vibradores de imersão ou equipamento semelhante, normalmente empregado nos concretos tradicionais de pavimentação.

Salienta-se que não existem grandes requisições quanto à granulometria ou aos índices de qualidade do agregado graúdo.

Figura 10- Concreto Rolado



Fonte: Concremix, 2018.

### 3.3.5 Pavimentos com Peças Pré-Moldadas

As peças pré-moldadas (Figura 11) de concreto são peças que quando colocadas lado a lado perpendicularmente ao eixo da pista formam uma bisetriz paralela a esse eixo, implicando em vértices dos ângulos das peças que estejam

sempre voltados para frente do conjunto em execução. No entanto, em cruzamentos ou entroncamentos, não é possível manter a mesma disposição, em razão do encaixe entre os blocos que faz com que a face voltada para frente do assentamento, não seja aquela em vértice.

Figura 11- Pavimento Pré Moldado



Fonte: Construção Mercado, 2016.

Ao serem transportadas para a pista, elas devem ser empilhadas de preferência à margem dessa pista com um número tal que a cobertura à faixa que lhe fica em frente.

Os ponteiros de aço devem estar sempre afastados em 10 (dez) metros, cravados ao longo de duas ou mais linhas paralelas ao eixo da pista, com distância do eixo igual a um número inteiro de vezes da distância entre dois lados paralelos das peças acrescidas das intermediárias. Quando as peças forem quadradas, faz-se a colocação da primeira peça com a aresta coincidindo com o eixo da pista. (DNIT, 2004).

Progressivamente, essas peças deverão ser colocadas sobre a camada de areia, acertadas no ato do assentamento de cada peça, de modo que sua face superior fique pouco acima do cordel e que as peças sejam pressionadas contra a areia ao mesmo tempo em que o operário deve pressionar a peça contra a areia para acertar a sua posição.

Assentada a primeira peça, a segunda será encaixada na primeira, pelas articulações, e assentada de acordo com a primeira. Após o assentamento, as peças são batidas com o soquete ou outro dispositivo.

No caso de peças sextavadas, faz-se o assentamento da primeira peça com uma aresta coincidindo com o eixo da pista, restando assim o vértice de um ângulo encostado à linha de origem do assentamento.

Por fim, a norma determina que os assentamentos pela via principal deve seguir normalmente e em via secundária, pela superfície, formando um triângulo. O preenchimento desse triângulo é feito da forma convencional, providenciando-se peças de forma e dimensões exigidas para a conclusão da cada linha. O rejuntamento das peças será feito com pedrisco seguido de derrame de asfalto.

### **3.3.6 Pavimento Sobre-Laje em Tabuleiros de Obras de Arte Especiais**

O projeto de uma obra de arte especial exige o conhecimento de uma quantidade razoável de dados que, genericamente, pertencem a dois grupos, o elemento de campo e os elementos básicos de projeto (BRASIL, 1996).

Ainda de acordo com o autor supracitado os elementos de campo são variados, podendo-se citar alguns como a planta de situação, a seção longitudinal do terreno ao longo do eixo da ponte a ser projetada, as características geotécnicas e geológicas do solo de fundação, as condições locais de acesso para transporte de equipamentos, materiais e elementos estruturais.

A disponibilidade de água, energia elétrica e mão-de-obra especializada, bem como as características locais principais tais como níveis máximos e mínimos das águas, ocorrência de secas ou inundações, amplitude de variação e variação brusca de temperaturas também compõem fatores que englobam o processo de pavimento sobre-laje (Figura 12) (BRASIL, 1996).

A análise da topografia geral da área, sendo região plana, ondulada ou montanhosa, as características da vegetação, a proximidade ou não de regiões urbanas é de suma importância para a elaboração correta deste processo de pavimentação.

Figura 12- Pavimento Sobre- Laje em Tabuleiro de Obras Especiais



Fonte: Skyscraper, 2017.

Por fim, os elementos básicos de projeto devem ser sempre observados, tais como: normas, especificações, manuais, detalhes padrão e princípios básicos, que devem ser seguidos na elaboração dos projetos de obras de artes especiais do (DNIT, 2006).

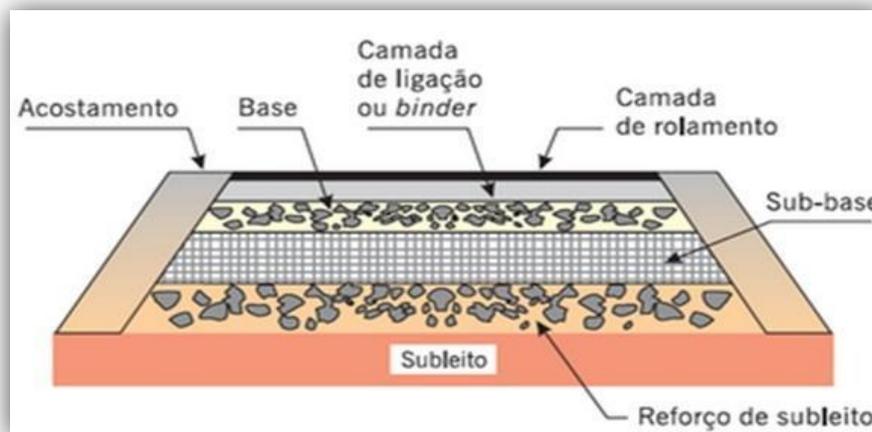
### 3.4 Pavimentos Flexíveis

Não menos importante, os pavimentos flexíveis são bastante utilizados e é de grande importância quando se diz a respeito de malhas asfálticas.

Em outras palavras são aqueles em que as deformações, até certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente à compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam as estruturas as deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga (SENÇO, 2007).

A Figura 13 apresenta um modelo de manta asfáltica flexível.

Figura 13- Pavimento Flexível (Corte Transversal)



Fonte: Inova, 2015.

Segundo Bernucci, et al (2008, p.32.), “os revestimentos das estruturas de pavimento em geral são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão”. Em certos casos, uma camada subjacente ao revestimento pode ser composta por materiais estabilizados quimicamente de modo a proporcionar coesão e aumentar sua rigidez, podendo resistir a esforços de tração. Embora possuam coesão, as camadas de solos finos apresentam baixa resistência à tração, diferentemente dos materiais estabilizados quimicamente.

Ainda de acordo com o autor anteriormente citado os pavimentos são compostos por um revestimento de camada asfáltica, seguido respectivamente de base, sub-base e subleito, que podem ser compostos de materiais granulares, solos ou misturas de solos, no entanto não há presença de material cimentante.

A Figura 14 apresenta uma variedade de materiais que podem ser usados em cada camada do pavimento flexível.

Figura 14- Tipos de Material Usado Para Camadas Do Pavimento Flexível



Fonte: ADADA, 2008.

Existem alguns tipos de pavimentos flexíveis e Senço (2007, p.15) os define como:

- Base de solo estabilizado: É uma camada construída com solo satisfazendo determinadas especificações, granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade, cuja estabilização pode ser conseguida de forma natural ou artificial.
- Base de macadame hidráulico: O macadame hidráulico é uma variante do macadame original. Trata-se de uma base ou sub-base constituída de uma ou mais camadas de pedra britada, de fragmentos entrosados entre si e material de enchimento.
- Base de brita graduada: Trata-se de um tipo de base que ganhou a preferência entre as bases de pedra. É resultante da mistura, feita em usinas de agregado, previamente dosado, contendo inclusive de material de enchimento, água e, eventualmente, cimento. Guardada as proporções, principalmente quanto à granulometria dos materiais, é uma base que substituiu o macadame hidráulico, com grandes vantagens no que concerne ao processo de construção.
- Base de macadame betuminoso: Consiste na superposição das camadas de agregados interligadas por pinturas de material betuminoso. É chamada também de base negra, sendo que o número de camadas depende da espessura estabelecida em projeto.

- Base de paralelepípedo e de alvenaria poliédrica (por aproveitamento): Como base, correspondem a leitos de antigas estradas que, com a maior velocidade atingida pelos veículos, deixaram de apresentar interesse, dada principalmente a trepidação e a alta sonoridade que provocam.

Por fim, têm-se os revestimentos flexíveis, que de acordo com Senço (2007), os materiais constituintes são os mesmos da base rígida, com condições de resistir aos esforços horizontais e distribuir esforços verticais à sub-base.

Podemos citar como exemplo desses revestimentos, o concreto betuminoso usinado a quente, que nada mais é que o revestimento asfáltico mais utilizados nas vias urbanas e rodovias brasileiras. Tal revestimento consiste na mistura de específica de betume e outros componentes com essencial controle de granulometria. (CUNHA, 2010)

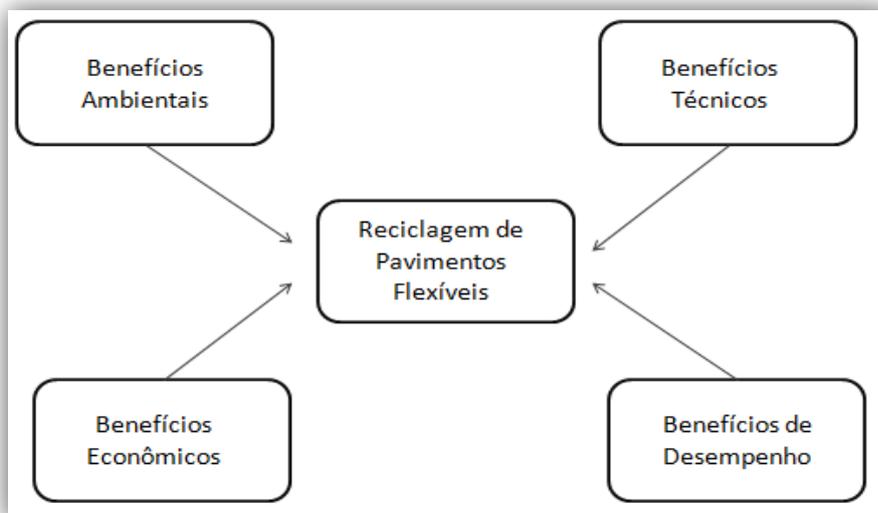
Existe também o revestimento pré-misturado a quente e o pré-misturado a frio. O primeiro é aquecido a uma temperatura próxima ao do betume, já o segundo, trata-se da mistura do agregado e asfalto, empregado sem o prévio aquecimento.

Ainda de acordo com o autor citado os calçamentos são outro tipo de revestimento, estes são característicos das vias urbanas e são menos favoráveis devido a sua demora na execução, bem como a incômoda sonoridade e trepidação que provocam quando entre em contato com os veículos.

Para finalizar, de acordo com Cunha (2010) temos outros modelos de revestimentos como os paralelepípedos, que tem grande durabilidade, a alvenaria poliédrica ou pedras irregulares, “que formam um mosaico e os blocos de concreto pré-moldados, que são produzidos em fábricas específicas para este fim e são bastante utilizados nas vias urbanas e estacionamentos, devido ao seu formato agradável”.

Os benefícios em relação à reciclagem de pavimentos flexíveis estão descritos na Figura 15.

Figura 15- Benefícios Relacionados à Reciclagem de Pavimento Flexível



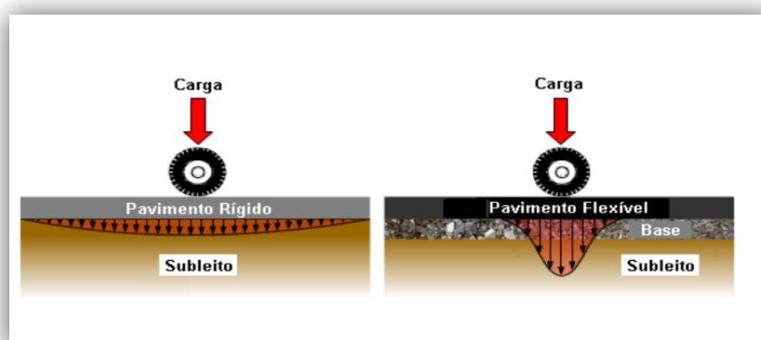
Fonte: Adaptado Cunha, 2010 p. 38.

### 3.5 Pavimentos Rígidos X Pavimentos Flexíveis

A Principal diferença entre os pavimentos rígidos e os flexíveis é sua capacidade de suportar os esforços empregados, no pavimento flexível à carga aplicada sobre ele é absorvida em uma área maior, já no pavimento rígido a carga é distribuída mais pontualmente, a capacidade elástica do pavimento flexível faz com que ele tenha uma maior maleabilidade e que suporte melhor as cargas empregadas sem que haja rompimento e fissuras neles.

A Figura 16 mostra a diferente forma de distribuição das cargas empregadas em ambos os pavimentos, é possível perceber que a distribuição no pavimento flexível se dá em um longo espaço, no pavimento rígido esse fato não ocorre.

Figura 16- Distribuição de Carga nos Pavimentos

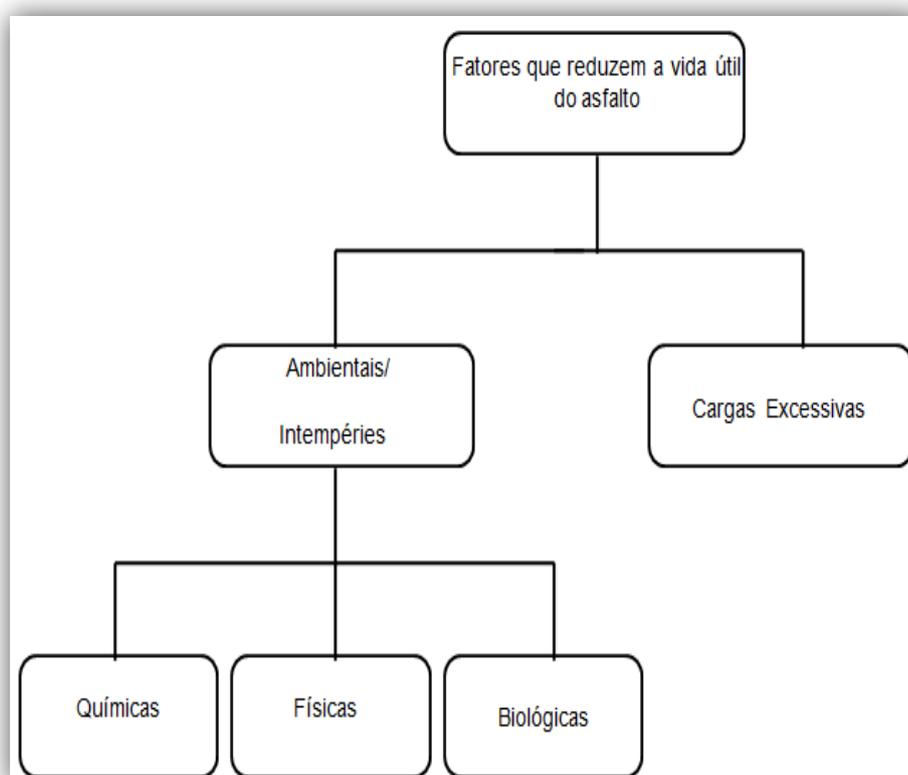


Fonte: Núcleo do Conhecimento, [s.d].

### 3.6 Reciclagem do Pavimento

Como pode ser superficialmente observado, os pavimentos tem um período de vida útil, podendo variar de acordo com as transformações naturais ou por degradações por excesso de pesos das cargas veiculares. Por isso o método de reutilização e reciclagem se torna tão importante dentro do cenário de engenharia civil brasileira. A Figura 17 a seguir retrata os fatores principais capazes de acelerar o processo de degradação do asfalto e com isso diminuir sua vida útil.

Figura 17- Fatores Prejudiciais ao Asfalto



Fonte: Os Autores, 2018.

Se tratando especificamente do instituto da reciclagem, este trabalho trata-se basicamente da reutilização e desagregação dos materiais do pavimento existente para a construção de novas camadas mediante a adição de ligantes, como medida de reabilitação do pavimento.

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

emulsão asfáltica novos, quando necessários, e também com adição de aglomerantes hidráulicos.

No Brasil, a primeira utilização da reciclagem aconteceu na cidade do Rio de Janeiro no ano de 1960 pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro (PMRJ), em que o material asfáltico foi removido por meio de martelletes, transportada para a usina e pré-misturado (PINTO, 1989, p.37).

Entende-se, portanto que a reciclagem asfáltica trata da remoção de materiais existentes nas pistas, que são quebrados por um trator, sendo posteriormente carregados e transportados até o sistema de britagem, e aproveitados pelas Usinas de Concreto, saindo como matéria prima adequada para a execução da sub-base do pavimento rígido ao longo da obra.

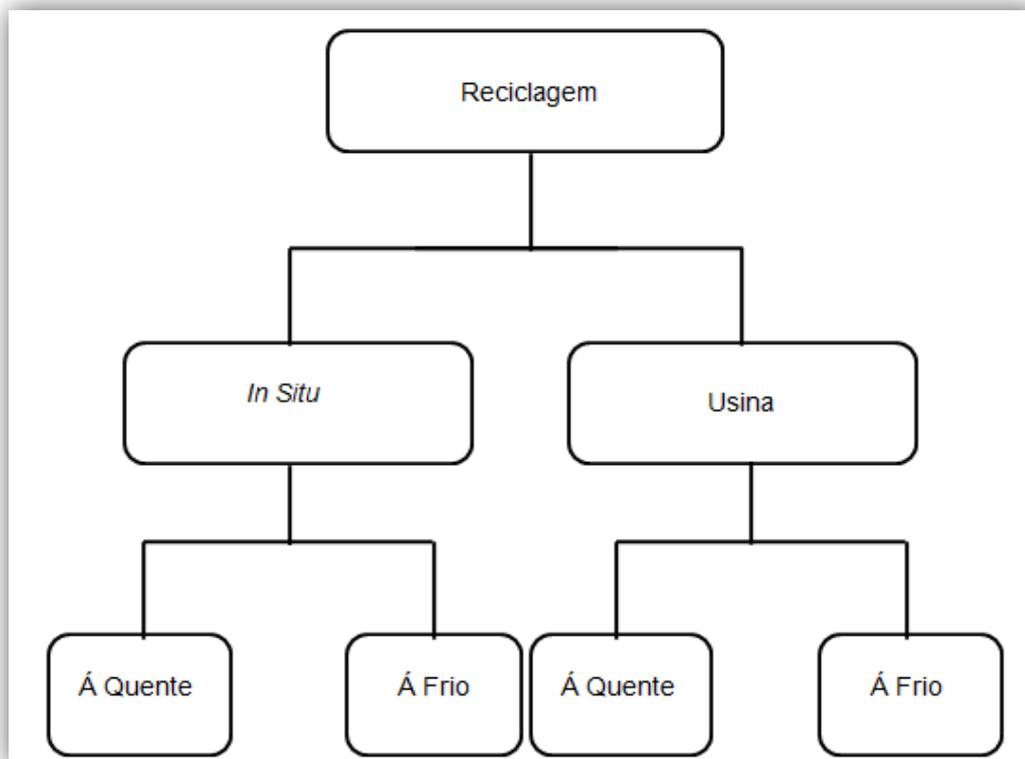
Sua relevância, que também é o foco deste projeto de pesquisa, está no fato de que quando realizada a reciclagem asfáltica, esta vem a evitar a exploração excessiva de recursos naturais como também contribuir para a sustentabilidade.

Além disso, colabora em muito para a economia de energia e materiais que em situações comuns, gerariam descarte de produtos deteriorados. Logo, contribui em muito para minimizar os impactos ambientais gerados com a construção de rodovias.

A reciclagem da manta asfáltica consiste em técnicas que tem como objetivo principal a transformação da camada do pavimento comprometida em uma nova. Segundo o DNIT apud Demuelenaere & Santos (2018), a reciclagem é uma alternativa para muitos problemas e apresenta muitas vantagens quando comparado à utilização convencional de materiais virgens. Promove a sustentabilidade além de ser um atrativo econômico.

A Associação de Reciclagem Asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming Association- ARRA) define cinco categorias principais de diferentes métodos de reciclagem (Kandhal, 1997 apud Demuelenaere & Santos, 2018. p.9) – “reciclagem à frio, à quente, a quente *in-situ*, a frio *in-situ* e reciclagem de camadas do pavimento”. Na maior parte das vezes, classificam-se as técnicas de reciclagem em duas modalidades, sendo elas a reciclagem a quente e a frio, podem ser executadas no próprio local, ou seja, *in situ* – ou em usina apropriada. A Figura 18 ilustra em forma de fluxograma as formas de reciclagem mais adotadas no Brasil, e as possibilidades quanto à reciclagem á quente e á frio.

Figura 18- Possibilidades de Reciclagem Asfáltica



Fonte: Os Autores, 2018.

Por tais motivos se faz necessário um melhor aprofundamento do tema, a fim de realizar amplo estudo que possibilite uma maior compreensão da problemática, que consistirá no estudo de caso envolvendo a BR 381, conforme já mencionado.

### 3.6.1 Reciclagem à Quente

A reciclagem à quente resumidamente consiste em métodos no qual o pavimento está com sua estrutura deteriorada, esse é retirado por intermédio de uma fresadora ou algum equipamento capaz de retirar a camada superficial total ou parcialmente a uma profundidade estabelecida por norma, posteriormente o material é transportado e estocado, esse material poderá ser reciclado em usina estacionária ou no próprio local. “O concreto asfáltico reciclado no local pode ser empregado como revestimento, base, regularização ou reforço do pavimento”. (DNIT, 2005 apud DEMULENAERE; SANTOS, 2018. p. 17).

A reciclagem a quente geralmente é realizada seguindo as especificações de serviço do DNIT ES 033/2005 e ES 034/2005.

Os principais fatores que devem ser observados para que seja escolhido o método de reciclagem á quente é observar as condições em que o asfalto se encontra o estado de desgaste, verificar a disponibilidade dos equipamentos para dar prosseguimento ao método, análise de toda regulamentação em relação ao meio ambiente e estudo de custos, após essas análises é possível fazer um comparativo e aprovar a viabilidade do método naquela ocasião tanto economicamente e ambientalmente. Segundo o DNIT (2005), a reciclagem a quente é capaz de corrigir deficiências de misturas betuminosas e ainda há possibilidade de aumentar a capacidade estrutural, com isso pode-se usa- lá antecedendo um recapeamento.

### **3.6.2 Reciclagem à Frio**

A reciclagem à frio pode ser realizadas *in situ* ou em usinas próprias, que podem também ser estacionária (móveis), o processo acontece com a adição de material de enchimento, caso necessário, e agente rejuvenescedor emulsionado (DNER, 1996 apud ZENI, 2016).

O processo se dá com a remoção total ou parcial do pavimento degradado, esse material é reduzido a dimensões apropriadas e posteriormente misturado á frio na construção de uma nova camada, nessa mistura podem ser adicionados emulsão, agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes, essa mistura pode ser usada como camada base, porém necessita de um pré-tratamento asfáltico. (DNIT, 2006)

A técnica é financeiramente mais viável e ambientalmente favorável, pois não há necessidade de aquecer o material reciclável, há menor gasto de energia e emissão pouco considerável de poluentes na atmosfera.

Essa técnica é muito comum na europa e a porcentagem de reaproveitamento do material fresado pode atingir cerca de 90% (DNER, 1996 apud ZENI, 2016).

## **3.7 Estudos Realizados**

### **3.7.1 Ensaio Realizado *In Loco***

- Densidade do Solo: Método capaz de determinar a densidade real de um determinado tipo de solo, ensaio simples que pode ser realizado no próprio local de recolhimento de amostra. No ano de 1933, Ralf Proctor publicou uma

série de artigos que ineditamente mostravam um dos mais importantes princípios da mecânica dos solos, que trazia que a compactação do solo depende da energia aplicada e da umidade do solo no momento da compactação (VARGAS, 1977). A partir desses estudos foi criado o ensaio de Proctor Normal que tem uma metodologia de fácil execução, custo baixo e de conceitos com que permite um fácil entendimento. Com a equação da curva de compactação do ensaio de Proctor Normal há a possibilidade de que matematicamente seja obtida a densidade do solo máxima ( $D_{smáx}$ ), também a umidade ótima para compactação com o determinado nível de energia aplicada. O ponto negativo é que o ensaio necessita de muito trabalho para ser realizado e de grande quantidade de solo para que seja determinada a curva de compactação, o que dificulta sua realização. (FIGUEIREDO et al., 2000).

- Cálculo de Recalque: O estudioso Rebello (2008) apresenta que recalque são as deformações sofridas pelo solo quando expostos á cargas da estrutura, podendo ocasionar em alguns casos o deslocamento da fundação, o movimento da estrutura pode causar danos irreversíveis na estrutura. Pinto (2002) cita que a deformação e a forma com que o solo se comporta depende da sua constituição e do estado do maciço. Caputo (2012) estabelece três formas distintas para os recalques provenientes de cargas estáticas: imediato, escoamento lateral e adensamento. Cálculo necessário para prever o quanto o material suporta de carga antes que haja algum dano como rupturas, trincas ou quebra do material.
- Viga Benkelman: Considerado o teste *in loco* mais usado para determinar deflexões em pavimentos que estejam em condições de carregamento, método familiar aos engenheiros e projetistas de pavimentação. A necessidade de que fosse ágil e com pouco custo a avaliação dos pavimentos levou ao uso do ensaio com a Viga (ALBERNAZ, 1997). Começou a ser usada em 1953, por ocasião da pista experimental da WASHO, no oeste dos EUA, metodologicamente feita por A. C. Benkelman um engenheiro americano, do Bureau of Public Roads (CARNEIRO, 1966). Ensaio onde a viga é utilizada para medir as deflexões do pavimento. O ensaio realizado no local neste estudo possibilitou mostrar a densidade do material, o ensaio de densidade necessita que seja realizados testes de resistência em alguns

corpos de prova, normalmente são feitos 6 para um estudo com menor margem de erro.

### **3.7.2 Ensaio Realizado em Laboratório**

São os testes realizados fora do campo, em laboratórios, pois estes necessitam de equipamentos mais elaborados, tem uma preparação mais complexa ou requer cálculos, o que impossibilita que os testes sejam feitos no local.

"O teor de umidade é definido como sendo a relação entre o peso da água existente no solo e o peso seco das partículas sólidas do solo, expressa em porcentagem" (CAPUTO, 1977 p.34)

- Teor de Umidade: É a porcentagem da relação entre o peso da água e o peso sólido das partículas, habitualmente são usados o método *Speedy* ou o método da estufa para encontrar a porcentagem.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Delineamento da Pesquisa

Segundo Gil (2002), a pesquisa é um processo racional e sistemático de progresso do método científico. O principal objetivo é assegurar respostas aos problemas apresentados.

O trabalho elaborado refere-se a uma pesquisa de natureza aplicada. De acordo com Barros e Lehfeld (2000, p. 78), a pesquisa aplicada tem como incentivo a necessidade de fornecer conhecimento para a utilização de seus resultados, com a finalidade de “contribuir para fins práticos, visando a solução mais ou menos imediata do problema encontrado na realidade”.

Desta forma, será feito um estudo de caso na BR 381, utilizando-se da técnica de reaproveitamento de concreto betuminoso (pavimento flexível/asfalto) para a fabricação do novo pavimento em concreto rígido.

Quanto à abordagem, trata-se de uma pesquisa qualitativa. O estudo será feito através de ensaios em laboratório e em campo onde serão especuladas as causas dos resultados. Desse modo, verificando ser uma pesquisa exploratória, será realizado um estudo de caso em um trecho na BR 381, baseado em pesquisa bibliográfica que foi desenvolvida com fundamento em material já elaborado.

### 4.2 Características Gerais da BR-381

A rodovia 381 também conhecida como Fernão Dias começou a ser construída na década de 50 do século passado, foi inaugurada em 1960 e finalizada em 1961 até o trecho total que liga os Estados de Minas Gerais e São Paulo.

A BR-381 liga as cidades de São Paulo até Belo Horizonte, seguindo até a cidade de Governador Valadares e logo depois São Mateus, no litoral de Espírito Santo, como mostra a Figura 19.

Figura 19- Trecho da BR-381

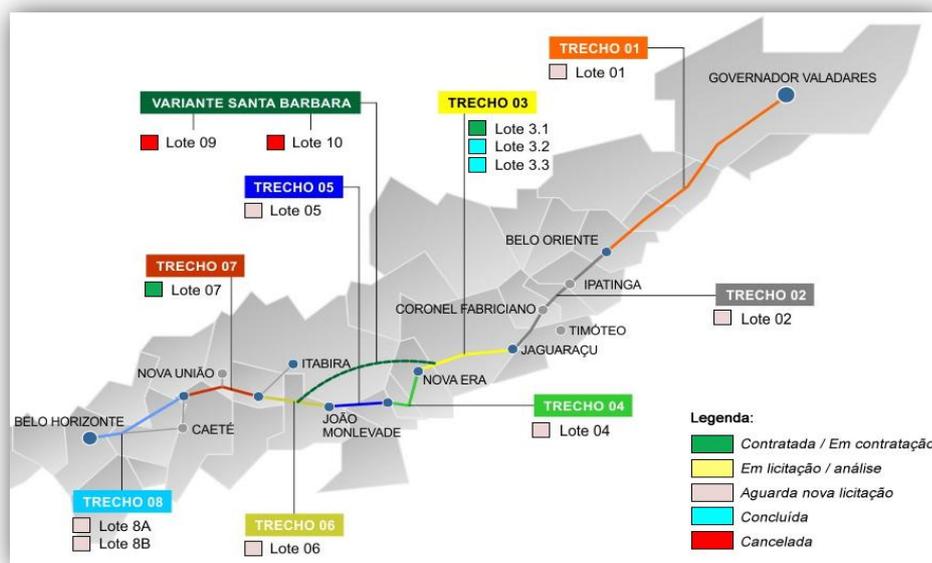


Fonte: MENDES, 2013.

Com o aumento da demanda de transporte de cargas a malha viária da rodovia necessitou ser duplicada, em 1973 foi apresentado o primeiro projeto de duplicação, desde então há vários projetos, alguns sendo executados, outros parados por falta de verba e ainda aqueles que não foram aprovados por irregularidades ou inviabilidade.

Atualmente, a BR-381 está sendo duplicada em alguns trechos no estado de Minas Gerais, como mostra a Figura 20. E alguns trechos já foram concluídos.

Figura 20- Trecho da BR-381 em Minas Gerais



Fonte: MOVIMENTO, 2017.

De acordo com o Site Movimento (2017), em números a Br-381 é demonstrada da seguinte forma “Mais de R\$ 4 bilhões em investimentos. Mais de 205 Km de pistas duplicadas. 64 obras de arte especiais (17 pontes e 47 viadutos); 5 túneis (2.385 metros de extensão); 20 passarelas; 99 paradas de ônibus. Mais de 83.300 metros de defensas.”

#### 4.3 Procedimentos Técnicos Iniciais do Pavimento Existente

O DNIT, juntamente com o Consórcio responsável pelas obras de Duplicação da BR-381/MG, realizou um processo de reaproveitamento de concreto betuminoso (pavimento flexível/asfalto) para a fabricação do novo pavimento da rodovia, que será em concreto rígido.

A Figura 21 mostra os possíveis tipos de aproveitamento do pavimento existente em um local, nota-se que são várias possibilidades para que haja a reciclagem ou reuso.

Figura 21- Fases do Reaproveitamento do Pavimento Existente



Fonte: Adaptada em DNIT, 2006.

O material existente nas pistas foi removido e quebrado por um trator, carregado e transportado até o Sistema de Britagem, (instalado ao lado do canteiro de Obras do Consórcio em Roças Novas Caeté-MG), onde é passado por uma

peneira para que toda a amostra fique homogênea numa mesma granulometria, e posteriormente utilizado no processo produtivo da Usina de Concreto, onde foi feita a moagem de uma certa quantidade passando na peneira 200 e levada para o laboratório uma porcentagem com cimento CP III- 40 RS, chegando a conclusão que 5% é o ideal para atingir a resistência e o mínimo de cimento economicamente viável saindo como matéria prima adequada para a execução da sub-base do pavimento rígido ao longo da obra.

#### 4.4 Execução do Trecho Experimental

Antes da aplicação da camada de reciclados com cimento foram realizados ensaios de viga de Benkelman na camada de subleito. A mistura dos reciclados com 5 % de cimento com um teor de umidade de 8% de água, foi produzida na Usina.

Foi definido um trecho experimental na pista esquerda, com a mistura de reciclados com cimento. O trecho foi executado em dois dias com a espessura da camada de 15 cm, embora o projeto inicial exigira dimensão de 20cm. A camada foi executada pelo processo de espalhamento com duas vibroacabadoras, mostrado na Figura 22.

Figura 22- Vista geral da execução da Camada de Reciclados.



Fonte: Autores, 2018.

A vibroacabadora tem a função de receber a carga de massa asfáltica do caminhão de abastecimento e espalhar o material através da mesa vibratória através de correias, como mostra na Figura 23, de modo a obter uma camada homogênea que após o processo de compactação tivesse uma espessura aproximada de 15 cm

e garantir um grau de compactação (GC) de 100% em relação à densidade de referência obtida no Proctor com energia modificada.

Figura 23- Espalhamento dos Reciclados com Cimento



Fonte: Autores, 2018.

Para a conclusão e acabamento, utilizam-se os rolos compactadores de asfalto. Existem 3 tipos de rolos compactadores: de pneus, em tandem liso e de três rodas liso. Com o rolo de pneus obtém-se um ajuste adicional pela possibilidade de variação da pressão dos pneus, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24- Vista geral da Compactação da Camada



Fonte: Autores, 2018.

Para posterior verificação das características dos reciclados com cimento aplicado, procedeu-se a recolha de amostras para realização dos seguintes ensaios laboratoriais:

- Ensaios de compactação, Proctor Modificado.

No dia da realização do trecho experimental, foram ainda realizados os seguintes ensaios “*In situ*”:

- Ensaios de frasco de areia, o que permitiu verificar a espessura da camada, determinar as densidades e umidades “*In situ*”, obtendo-se desta forma o grau de compactação em relação à densidade máxima do Proctor Modificado.
- Corpos de prova para ensaios de resistência a compressão simples e diametral, como mostra na Figura 25.

Figura 25- Corpo de Prova (Reciclado com Cimento)



Fonte: Autores, 2018.

Todo este processo foi executado de maneira a garantir o prazo de trabalhabilidade da mistura dos reciclados com cimento (< 2 Horas).

Após término dos trabalhos de compactação e ensaios de controle de qualidade, a camada de reciclados com cimento foi protegida contra a evaporação de água com uma aplicação de uma emulsão asfáltica, mostrado na Figura 26.

Passados 14 dias de cura foram realizados os seguintes ensaios “*In situ*”:

- Viga de Benkelman;
- Ensaios de Carga com Placa.

Figura 26- Execução da Pintura contra Evaporação de Água



Fonte: Autores, 2018.

#### 4.5 Ensaios de Laboratório

O ensaio realizado em laboratório foi:

- Ensaio de Compactação (Proctor)

De acordo com o DNIT através da Norma 164/2013, é realizado em ensaio em solos para “determinar a correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente do solo seco”.

A norma estabelece um método de determinação de procedimentos para realização deste ensaio. As ferramentas utilizadas para este ensaio foram as seguintes:

- Recipiente metálico de molde de formato cilíndrico, de dimensões aproximadamente de 15,24 cm com diâmetro interno 0,05 cm, e 17,18 cm com altura de 0,02 cm, com entalhe elevado na parte exterior com metade da espessura; cilindro que complementa a forma com 6,08 cm de altura e com diâmetro igual ao do molde metálico, com entalhe abaixo em sua parte interna, com metade da espessura e 1 cm de altura; e o suporte de metal com um aparato de se fixar a forma cilíndrica e ao cilindro que complemento.
- Disco espaçador de metal como mostra a Figura 27, com 15 cm de diâmetro e altura referente a 6,35 cm;

Figura 27- Disco Espaçador de Metal



Fonte: Autores, 2018.

- Soquete de metal com formato cilíndrico, como mostra a Figura 28, de aparência plana em seu interior com diâmetro similar a 5,08 cm e 4,5 kg de massa, com 45,72cm de altura. A camisa cilíndrica do instrumento contém 4 furos, com 1 cm de diâmetro em sua borda com separação entre eles de 90°.

Figura 28- Soquete de Metal Cilíndrico



Fonte: Autores, 2018.

- Extrator de amostra do molde cilíndrico;
- Balança digital de 20 kg;
- Balança de 1 kg;
- Estufa;
- Moedor;
- Régua de aço;
- Repartidor de amostras;
- Cápsula tampada;
- Peneiras de 50; 19; 4,8 (mm);

- Proveta;
- Papel de filtro formato circular;
- Bandeja, espátula, colher de pedreiro, dentre outras pequenas ferramentas.

Após a identificação de todos os instrumentos, foi iniciado então o ensaio. Desta maneira, é feita a fixação da forma à base de metal, e o ajuste da amostra de concreto que tem massa similar a 90 kg. Em seguida, é coletada duas cápsulas de terra úmida, de silte ou argila, e uma cápsula para terra arenosa ou com pedras; foi determinada a massa de tais amostras em estado úmido e assim colocado na estufa a temperatura de 110° para secar; é determinado as massas aproximado de 0,01g e determinado a média como umidade de representação do corpo de prova compactado. Compactação do solo na fôrma com o disco espaçador, de fundo falso de maneira a fazer cinco camadas similares, e assim obtidas uma altura total do corpo de prova depois de compactado.

Foi aplicado golpes através do soquete em cada camada do solo, fazendo com que o mesmo fique bem compactado de maneira uniforme. Em seguida, foi retirado o cilindro complementar, e com a régua foi feito o nivelamento do excesso da amostra na estatura da fôrma, e determinado a massa da amostra úmida compactada com a da fôrma. Por meio de subtração da massa da fôrma foi determinado a massa úmida da amostra compactada (P'h).

Foi repetido o processo mais algumas vezes para a obtenção de resultados para a concretização da curva de compactação da amostra.

Para determinação de teor de umidade faça-se o cálculo:

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Onde:

h = teor de umidade em porcentagem;

Ph = massa da amostra úmida;

Ps = massa da amostra seca em estufa

Para determinação de massa específica é feito o cálculo:

$$Yh = \frac{P'h}{V}$$

Onde:

Yh = massa específica aparente do solo úmido;

$P'h$  = massa do solo úmido compactado;

$V$  = volume do solo compactado.

Para cálculo de determinação da massa específica aparente do solo seco, após cada compactação.

$$Y_s = Y_h \times \frac{100}{100 + h}$$

Onde:

$Y_s$  = massa específica aparente do solo seco;

$Y_h$  = massa específica aparente do solo úmido;

$h$  = teor de umidade do solo compactado, em porcentagem.

#### 4.6 Ensaio “In Loco”

O termo “in loco” é uma expressão que significa “no próprio local”. Logo, ensaio “in loco” quer dizer que o ensaio foi realizado no próprio local onde ele se situa, e estes ensaios foram:

##### 4.6.1 Grau de Compactação (Frasco de Areia)

De acordo com a norma técnica do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem em relação a métodos de ensaio (DNER-ME 092/94), o processo neste ensaio consiste em determinar a massa específica aparente no solo, “in situ”, com a utilização do frasco de areia, colocado no subleito do pavimento e suas respectivas camadas.

Foram utilizados os seguintes instrumentos para a realização deste ensaio. A Figura 29 ilustra alguns destes instrumentos:

- Frasco de plástico, de capacidade média de 3,5 litros, atribuído de um gargalo rosqueado com o funil de rosca que foi enroscado junto ao frasco;
- Recipiente quadriculado de alumínio, com um furo de formato circular em seu meio, de maneira que o funil possa ser apoiado;
- Pá de mão
- Uma balança;
- Um martelo

- Ferramenta de forma circular de seção circular pequena, como um vergalhão, feita de aço, para que penetre no solo, com a força do martelo e assim o solo fique quebradiço e possa ser retirado;
- Duas espécies de concha, para a retirada da amostra do solo;
- Um recipiente metálico para se colocar a amostra do solo;
- Areia, que foi coletada através do solo do pavimento.

Figura 29- Ferramentas Utilizadas para Ensaio de Grau de Compactação



Fonte: Autores, 2018.

No ensaio foram feitos os respectivos procedimentos para:

- “Determinação do peso da areia equivalente ao volume do funil e do rebaixo do furo na bandeja” foi feito da seguinte maneira, após a montagem do frasco cheio com areia com o funil, é feita a pesagem na balança (P1). Em seguida, o frasco juntamente com o funil foi colocado sobre o recipiente quadrado, e o recipiente posto em cima de uma região plana, como mostra a Figura 30, logo, é feita a abertura no registro do funil, fazendo com que a areia se escoe através da passagem do funil, até que parar o seu movimento dentro do frasco. Assim, é fechado o registro, e o frasco com o funil são retirados, realizado novamente a pesagem do frasco com o funil com o restante de areia que ficou dentro (P2), de acordo com a Figura 31. O peso da areia deslocada, que completou o volume do funil e do rebaixo do orifício se dá através a subtração  $P3 = P1 - P2$ .

Figura 30- Frasco com Areia e Funil



Fonte: Autores, 2018.

Figura 31- Pesagem do Material na Balança



Fonte: Autores, 2018.

- “Determinação da massa específica aparente de areia”, da seguinte maneira, após a montagem do frasco cheio com área com o funil, é feita a pesagem na balança (P4). Em seguida, o frasco juntamente com o funil foi colocado sobre o recipiente quadrangulado e o recipiente posto sobre a beira de um cilindro, com o volume existente, é feito a abertura no registro do funil, fazendo com que a areia se escoe através da passagem do funil, até que parar o seu movimento dentro do frasco. Assim, é fechado o registro, e o frasco com o funil são retirados, realizando novamente a pesagem do frasco com o funil com o restante de areia que ficou dentro (P5).

O peso da areia que encheu o cilindro é então:  $P_6 = P_4 - P_5 - P_3$

E a massa específica será:  $M_a = P_6 / V$

Onde:  $M_a$  = Massa específica aparente na areia ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$V$  = Volume do cilindro ( $\text{cm}^3$ )

- “Determinação da massa específica aparente do solo, “in situ””, foi feito da seguinte maneira: em uma região limpa e plana, foi colocada uma bandeja que contém um furo em seu centro e feito uma escavação de formato cilíndrico no solo de acordo com o furo da bandeja como mostra a Figura 32, com sua profundidade aproximadamente de 15 cm como mostra a Figura 33. Logo após, é retirado o solo da escavação e reservado para ser pesado ( $P_h$ ). Em seguida é recolhido 100g desta amostra para determinação de umidade ( $h$ ) através do processamento feito em estufa, do “Speddy”. Logo, é pesado o frasco com área juntamente com o funil ( $P_7$ ). Depois, o frasco de área junto com o funil é fixado sobre o furo na bandeja. É feito a abertura no registro do funil, fazendo com que a areia se escoe através da passagem do funil, até que parar o seu movimento dentro do frasco. Assim, é fechado o registro, realizando a pesagem do frasco com o funil com o restante de areia que ficou dentro ( $P_8$ ).

Peso da areia deslocada ( $P_9$ ) se obtém através da diferença de:

$$P_9 = P_7 - P_8$$

Peso da areia que preenche a cavidade no solo ( $P_{10}$ ) se dá pela equação:

$$P_{10} = P_9 - P_3$$

A massa específica aparente em solo úmido ( $M_h$ ):

$$M_h = M_a \times (P_h / P_{10})$$

A massa específica aparente em solo seco ( $M_s$ ):

$$M_s = M_h \times (100 / 100 + h)$$

Grau de compactação:

$$GC = (M_s / M_{s1}) \times 10$$

Onde:

$M_s$  = Massa específica aparente do solo “in situ”

$M_{s1}$  = Massa específica aparente do solo seco, obtida em laboratório.

Figura 32- Realização da Escavação com Bandeja de Furo no Centro.



Fonte: Autores, 2018.

Figura 33- Profundidade da Escavação



Fonte: Autores, 2018.

#### 4.6.2 Viga Benkelman

De acordo com o DNIT através da Norma 133/2010, é feito em “pavimentos asfálticos ensaio para delinear a linha de influência longitudinal da bacia de deformação elástica do pavimento por meio da Viga Benkelman”.

A norma estabelece procedimentos e condições mínimas a serem seguidos para execução deste ensaio.

A viga Benkelman é um instrumento utilizado em obras para medição de deflexões ocasionadas em uma espécie de extensômetro ligado a uma alavanca interfixa.

Os instrumentos e materiais utilizados neste caso seguem listados e ilustrados na Figura 34.

- Viga Benkelman;
- Caminhão de roda dupla;
- Calibrador, usado para medição de pressão entre os pneus do caminhão;
- Régua de 3,0m.

Figura 34- Viga Benkelman e Caminhão de Roda Dupla



Fonte: Autores, 2018.

Desta maneira, é feito a marcação das estações devidamente colocadas nas trilhas da roda, assim, a roda dupla da parte de trás do caminhão é distanciada da borda de revestimento.

É feito então o processo de centralizar uma das rodas duplas do veículo acima da estação escolhida na trilha externa, fazendo com que o eixo de carga do veículo fique perpendicular ao eixo da pista de rolamento.

Logo, foi feito o posicionamento vertical da ponta da Viga Benkelman no centro da roda dupla direita do caminhão no ponto escolhido, analisando sempre uma referência para que a ponta da viga fique posicionada da maneira correta para se fazer o ensaio.

A viga é posicionada a ponto de que o motorista do caminhão sempre a veja, de maneira a observá-la durante o ensaio. Assim, foi feito o destravamento da viga e o extensômetro colocado aproximadamente no meio da viga, em seguida, foi ligado o vibrador para se realizar a primeira leitura ( $L_0$ ).

Desta maneira, o caminhão foi ligado e posto a movimentar de maneira lenta para frente. Após o caminhão parar, é feita a primeira leitura intermediária com o vibrador ligado. Foram anotados também a distância percorrida do caminhão e seu deslocamento em relação à régua utilizada para fazer este ensaio.

O procedimento foi realizado consecutivamente da mesma forma para conseguir outras leituras intermediárias como ( $L_1$ ), ( $L_2$ ), ( $L_3$ ) e ( $L_4$ ).

Cálculo de deflexão nos pontos correspondentes aos variados deslocamentos:

$$D_0 = (L_0 - L_f) a/b$$

$$D_n = (L_n - L_f) a/b$$

Onde:

$D_0$  = Deflexão em centésimos de milímetros no ponto de prova inicial;

$D_n$  = Deflexão nos pontos correspondentes aos variados deslocamentos do caminhão;

$L_0$  = Leitura inicial

$L_n$  = Leituras correspondentes aos variados deslocamentos do caminhão;

$L_f$  = Leitura final;

a e b = Dimensões do braço da viga.

#### **4.6.3 Ensaio de Carga com Placa (Cálculo de Recalque)**

De acordo com o DNIT através da norma 055/2004, é feito o “ensaio de determinação do coeficiente de recalque do subleito e sub-base de pavimentos de concreto em pistas de circulação de tráfego constante”.

Inicialmente é feito a identificação do subleito, terreno feito para aplicação de outras camadas do pavimento, e da sub-base que é uma camada feita após aplicação da placa de concreto.

Em seguida é feito a determinação dos pontos, onde é executado o ensaio. Com base nas determinações do pavimento, e de acordo como a norma permite, foi

determinado dois pontos, com um distanciamento entre eles de 100 metros. A montagem dos equipamentos está ilustrado na Figura 35.

Os instrumentos mecânicos utilizados para a realização do ensaio foram:

- Um caminhão;
- Macaco hidráulico, atribuído com um manômetro;
- Placa circular rígida de aço, denominada placa de prova, de diâmetro médio 79 cm;
- Deflectômetros, e suas ferramentas que o acompanham: duas hastes verticais de aço galvanizado, viga para sustentar as hastes para que se possa fixar o deflectômetro, hastes com função de fixação vertical e horizontal;
- Nível para pedreiro;
- Trena;
- Enxada;
- Picareta;
- Alicate;
- Chave de Grifo.

Desta maneira, é feito uma abertura no local de ensaio até a cota necessária, menor do que o diâmetro da placa de prova. A superfície onde é colocada os apoios e a placa de prova são planos e nivelados, e foi feito uma superfície de areia, como exige a norma, de aproximadamente 2 à 5 cm.

Figura 35 - Montagem dos Equipamentos para Ensaio de Recalque



Fonte: Autores, 2018.

Foi realizada a montagem das ferramentas sob a superfície de areia, movendo-a de maneira que a placa de prova ficasse sob uma superfície lisa e nivelada. O caminhão posto a posição de sua utilização no ensaio. Foi feito a montagem do suporte do deflectómetro, e em seguida, os mesmos foram fixos a viga, formando uma espécie de quadrado por cima da placa. O macaco hidráulico colocado na estrutura da placa que foi fixada no caminhão, de acordo com a Figura 36 e 37.

Figura 36- Equipamentos para Ensaio de Recalque



Fonte: Autores, 2018.

Figura 37- Utilização do Macaco Hidráulico



Fonte: Autores, 2018.

Após a montagem de todos os equipamentos necessários, é feita a execução do ensaio, de acordo como exige a norma. Os reajustes dos deflectômetros, para que sejam utilizados os cursos máximos é de extrema importância para iniciar o

ensaio. É feito então sob a placa um carregamento a fim acomodá-la no lugar certo, porém, é fácil de perceber que a mesma se movimenta verticalmente durante este processo. Após os deflectômetros se estabilizarem, é estabelecida uma pressão equivalente ao carregamento, que se chama Pressão de Adensamento ( $P_{ad}$ ).

Em seguida, se reajusta a placa com o valor de pressão de adensamento ( $P_{ad}$ ) dividido por 2 e feito o registro das leituras iniciais de referência, posteriormente a estabilizar os deflectômetros.

Logo, se começa o processo de carregamento de forma moderada, com variações padronizadas do estímulo do macaco, até que o acréscimo de pressão da placa seja de 0,015 a 0,020 min sucessivos. Após os deflectômetros se estabilizarem é feito o registro das leituras obtidas neste processo.

Continuando os processos do ensaio, são feitos carregamento seguido atrás de carregamento, até que se consiga obter 0,15 a 0,18 MPa, o que possibilita uma quantidade de acréscimo satisfatório para que se desenvolva a curva “pressão-deslocamento”.

É tirado com cautela o macaco hidráulico, se realizando mais ou menos de duas a três leituras intermediárias de regresso e uma de final, para obter a pressão do processo acima.

O coeficiente de recalque se dá através da fórmula:

$$k = \frac{P}{w} = \frac{P_{0,127} - \frac{P_{ad}}{2}}{w}$$

Onde:

$k$  = coeficiente de recalque;

$P_{0,127}$  = pressão correspondente ao deslocamento de 0,127 cm;

$P_{ad} / 2$  = metade da pressão de adensamento;

$w = 0,127$  cm.

## 5. RESULTADOS E DISCURSSÕES

### 5.1 Ensaio de Compactação (Proctor)

O ensaio realizado neste processo foi feito no trecho experimental. Conforme mostrado na Tabela 1, os resultados obtidos foram:

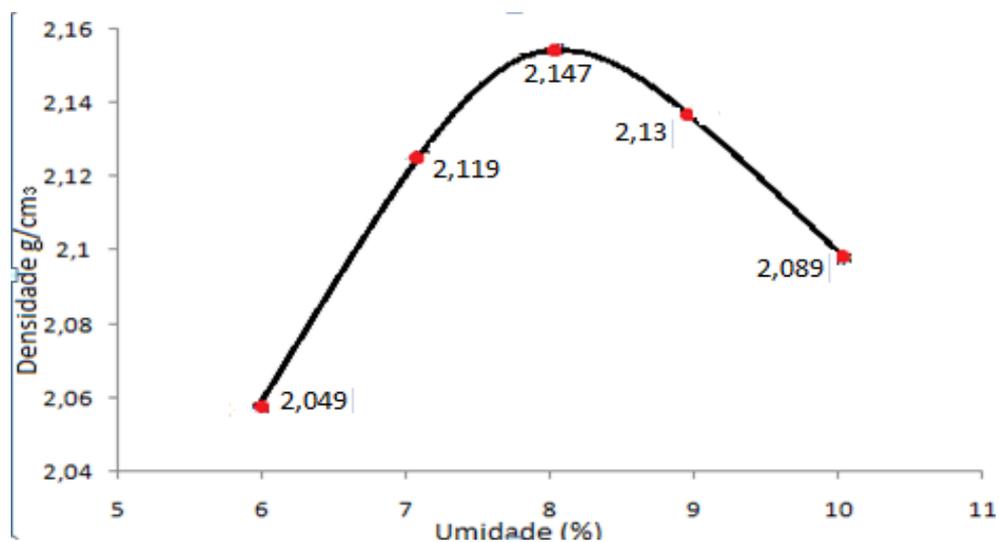
Tabela 1: Ensaio de Proctor

<b>Cilindro nº</b>	129	105	102	111	129
<b>Umid. média (g)</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Água adicionada</b>	420	490	560	630	700
<b>Água adicionada(%)</b>	6	7	8	9	10
<b>M + S + A</b>	8620	8845	8960	9155	880
<b>M – Molde</b>	4110	4125	4045	4335	4110
<b>S + A</b>	4510	4720	4915	4820	4770
<b>Volume Molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2076	2082	2119	2076	2076
<b>Densidade Úmida (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2172	2267	2319	2322	2298
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2049</b>	<b>2119</b>	<b>2147</b>	<b>2130</b>	<b>2089</b>

Fonte: Autores, 2018.

Após as devidas análises, foi plotado o gráfico onde se observa que o ponto máximo da Curva corresponde ao peso específico seco máximo do solo é 2,147 g/cm<sup>3</sup> e o Teor de Umidade Ótima é 8%. (Gráfico 1).

Gráfico 1- Umidade X Densidade



Fonte: Autores, 2018.

## 5.2 Grau de Compactação (Frasco de Areia)

Na tabela 2, apresentam-se os resultados dos ensaios do grau de compactação (Frasco de areia) obtidos no trecho.

Tabela 2: Grau de Compactação (Frasco de Areia)

Ensaio N°	Estaca N°	Espessura do Furo	Grau Compactação
		(cm)	(%)
1	405	15	100,8
2	404	15,5	101,7
3	403	15,5	102
4	401	15	102,1
5	399	16	101,6
6	397	15,8	101,5
7	395	15,7	101,8
8	393	15,8	101,5
9	392	15,6	101,5
10	390	15,1	102

**MÉDIA**

**15,5**

**101,7**

Fonte: Autores, 2018.

A espessura do furo representa a espessura da camada. O valor de grau de compactação obtido no controle do material reciclado com 5% de cimento nas camadas deveria ser > 100% do Proctor Modificado, conforme exigências do projeto da empresa responsável pela execução do trecho. Logo, observa-se que o valor médio obtido foi de 101,7%, o que atende as especificações.

### 5.3 Viga Benkelman

Antes da aplicação da camada de reciclados com cimento, realizou-se os ensaios de viga Benkelman na camada de subleito e sub-base. Neste ensaio, o projetista determina o limite máximo que a leitura da viga pode ter. Para cada viga, utiliza-se uma constante calibrada que é multiplicada por 3 (três) em razão do tripé da viga. O resultado final da multiplicação determina a deflexão final. Os valores obtidos enquadram-se nos parâmetros definidos para valores menores ou iguais a 91 milímetros ( $\leq 91$  mm) no subleito, conforme tabela 4.

Tabela 4: Viga Benkelman (Continua)

Data	Estaca	Roda	Leitura	Constante	Valores Finais da Deflexão
			(mm)	(K)	(mm)
25/06/2018	389	Direita	7	3	21
		Esquerda	4		12
25/06/2018	390	Direita	2		6
		Esquerda	9		27
25/06/2018	391	Direita	3		9
		Esquerda	1		3
25/06/2018	392	Direita	4		12
		Esquerda	5		15
25/06/2018	393	Direita	3		9
		Esquerda	3		9
25/06/2018	394	Direita	4		12
		Esquerda	2		6
25/06/2018	395	Direita	2		6
		Esquerda	4		12
25/06/2018	396	Direita	4		12
		Esquerda	4		12
25/06/2018	397	Direita	3		9
		Esquerda	5		15

#### 5.4 Ensaio de Carga com Placa (Cálculo de Recalque)

O recalque é executado em cima do agregado com cimento. O cálculo é efetuado para uma carga com 31,3 KN, conforme citado na Norma DNIT 055/2004 ME. São realizadas 3 (três) leituras do deflectômetro, onde registra quantos milímetros (mm) cada um deles se deslocaram. Conforme, inseridos na Tabela 3.

Tabela 3: Ensaio de Carga com Placa

Ensaio N°	Carga Específica (KN)	Leitura do Deflectômetro (mm)		
1	9	0,4	0,04	0,07
2	19	0,5	0,08	0,09
3	29	0,5	0,07	0,01
4	<b>31,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,09</b>	<b>0,14</b>
5	39	0,6	0,1	0,16
6	49	0,7	0,18	0,21
7	59	0,8	0,18	0,25
8	69	0,8	0,22	0,29
9	79	0,9	0,25	0,33

Fonte: Autores, 2018.

## 6. CONCLUSÃO

Conclui-se que reciclar pavimentos de uma via de circulação é, portanto, uma obra civil que enseja antes de tudo, a melhoria operacional para o tráfego, na medida em que é criada uma superfície mais regular (garantia de melhor conforto no deslocamento do veículo), mais aderente (garantia de segurança em condições climáticas adversas) e uma superfície menos ruidosa diante da ação dinâmica dos pneumáticos (garantia de melhor conforto ambiental), seja qual for a melhoria física oferecida.

A qualidade do pavimento das rodovias tem impacto direto no desempenho do transporte rodoviário e na economia do Brasil. Uma rodovia com más condições de pavimento aumenta o custo operacional do transporte, reduz o conforto e a segurança dos passageiros e das cargas, além de causar prejuízos ambientais.

Visando uma melhora na qualidade de aplicação do pavimento reciclado é importante que sejam realizados ensaios com intuito de mitigar possíveis danos a um pavimento alocado em local inapropriado sem as devidas alterações.

A reciclagem que está sendo empregada na BR 381 em Minas Gerais se mostra uma como uma operação inovadora com fim de mitigar impactos ambientais e o reaproveitamento ainda leva a ganhos no quesito finanças.

Sabe-se, mesmo que de forma qualitativa, (pois não foi abordado dados numéricos acerca de valores de economia), e que a empresa obteve ganhos significativos, pois não teve que investir em bota fora áreas de reflorestamento. Além disso, percebe-se também o ganho para o meio ambiente e a questão do viés sustentável que a empresa conseguiu atingir de certa forma.

Para chegar ao traço ideal, constatou-se que 5% de cimento CP III- 40 RS já se obtiveram as características necessárias em projeto, permitindo que 15 cm é camada ideal a ser aplicada, proporcionando maior economia de recurso no processo.

Com os resultados dos ensaios realizados no material reciclado, pode-se concluir também que o comportamento físico do material mostra-se satisfatório diante dos valores recomendados pela norma. Todos os ensaios que avaliaram as características do material mostraram-se que atendem com valores superiores aos requisitos mínimos determinados em projetos e normas vigentes. Isso sugere que tal

medida possa ser futuramente, aplicada em demais trechos de outras rodovias que se encontram em estado de manutenção.

Conclui-se também que é perfeitamente viável a realização de novos ensaios com diferentes teores de cimento para tentar, talvez, reduzir a espessura da camada uma vez que já foi evidenciado no trabalho que a espessura de 15 cm foi obtida com facilidade e isso despertou o interesse interno da equipe técnica em realizar novos ensaios para se diminuir tal espessura. Abre espaço para trabalhos futuros visando traços diferentes para maior aproveitamento do material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. **Concreto de Cimento Portland**. 2017. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>. Acesso em 22 de jun de 2018.

ADADA, Lucas Bach. **Pavimentos Asfálticos e Cimento Portland**. p.89. Paraná, 2008. Disponível em: < <https://pt.slideshare.net/MarcosVinicius414/pavimentos-flexiveiserigidos-lucasadada> >. Acesso em 10 nov 2018.

ALBERNAZ, C. A. V. **Método Simplificado de Retroanálise de Módulos de Resiliência de Pavimentos Flexíveis a Partir da Bacia de Deflexão**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, 1997.

ALMEIDA, Eduardo Simões. **A Duplicação Da Rodovia Fernão Dias: Uma Análise De Equilíbrio Geral**. 2004USP- Tese de Mestrado. 196 f. São Paulo. 2004. Disponível em:< <http://www.anpec.org.br/encontro2004/artigos/A04A130.pdf>>. Acesso em: 23 de Set de 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica – Materiais, Projetos e Restauração**. 1º Edição.São Paulo. 2007.

BARROS, A.J.F; LEHFELD, N.A.S. **Fundamentos de Metodologia**: Um guia para a iniciação científica. 2 Ed. São Paulo, 2000.

BERNUCCI, Liedi Bariani. DA MOTA, Laura Maria Goretti. CERATTI, Jorge Augusto Pereira. SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. 2008. 3º Edição. Rio de Janeiro.

BERNUCCI, Liedi Bariani... [et al.].**Pavimentação asfáltica** : formação básica para engenheiros – Rio de Janeiro : PETROBRAS: ABEDA, 2006. 116 f.[org]. Disponível em :< <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2018/03/Cap-2-Ligantes-asf%C3%A1lticos.pdf>>. Acesso em 21 de Set de 2018.

BRASIL, DNER-ME 092/94: **Solo** – determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia.

BRASIL. DNER- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **Manual de projeto de obras especiais**. p.233. Rio de Janeiro, 1996.

BRASIL, DNIT- Departamento Nacional de Infra- Estrutura e Transporte. **Manual de Pavimentos Rígidos**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004. 233 p. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/normas/download/Manual%20de%20Pavimentos%20R%EDgidos%20-%20VERS%C3O%20INICIAL.pdf>>. Acesso em: 06 Jun 2018.

BRASIL, DNIT- Departamento Nacional de Infra- Estrutura e Transporte. **Pavimentos Rígidos**: Execução de pavimentos rígidos com equipamentos de forma deslizante. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004. 15 p

BRASIL, DNIT- Departamento Nacional de Infra- Estrutura e Transporte. **Manual de Pavimentos Rígidos**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005. 249 p. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/normas/download/Manual%20de%20Pavimentos%20R%EDgidos%20-%20VERS%C3O%20INICIAL.pdf>>. Acesso em: 14 Jun 2018.

BRASIL, DNIT- Departamento Nacional de Infra- Estrutura e Transporte. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 310 p. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual%20de%20Pavimenta%E7%E3o\\_05.12.06.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimenta%E7%E3o_05.12.06.pdf)>. Acesso em: 26 Jun 2018.

BRASIL, DNIT – 033/2005: **Pavimentos flexíveis** – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de serviço. Espírito Santo, 2005.

BRASIL, DNIT – 034/2005: **Pavimentos flexíveis** – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de serviço. Espírito Santo, 2005.

BRASIL, DNIT – 049/2004: **Pavimento Rígido** – Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-deslizante – Especificação de serviço. Espírito Santo, 2004.

BRASIL, DNIT – 055/2004-ME: **Pavimento rígido** - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL, DNIT 133/2010-ME: **Pavimentação asfáltica** – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL, DNIT – ME 164/2013. Solos – **Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

CARNEIRO, F.B.L. Viga Benkelman - **Instrumento Auxiliar do Engenheiro de Conservação**. Caderno de Engenharia Rodoviária 2. Secretaria de Comunicações e Transporte. DER/RJ, 1966.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2012.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Vol. 2. São Paulo, SP, 3ª edição revista e ampliada, Editora LTC, 456 p.1977.

CIMENTO ITAMBÉ. **Whitetopping**. 2016. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br>>. Acesso em 24 de Jun de 2018.

CONCREMIX. **Concreto Rolado**. 2018. Disponível em:<<http://www.concremix.com.br>>. Acesso em 23 de Jun de 2018.

CONSTRUÇÃO MERCADO. **Pavimento de Peças Pré-Moldadas**. 2016. Disponível em: <<http://construcaomercado17.pini.com.br>>. Acesso em 24 de Jun de 2018.

CUNHA, Célia Melo. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem**. 2010, 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Lisboa, 2010. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/47129981.pdf>>. Acesso em: 25 de Set de 2018.

DEMUELENAERE, Rafael Gerard de Almeida; SANTOS, Mariana dos Reis. **Reciclagem de Pavimento Asfáltico a Quente *In Situ***. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 02, Vol. 01, pp. 5-16, Janeiro de 2018. Disponível em :< <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/reciclagem-pavimento-asfaltico-quente>>. Acesso em: 28 de Jul de 2018.

FAMETH. **Espaçador Soldado**. 2017. Disponível em:<<http://www.fameth.com.br>>. Acesso em 25 de Jun de 2018.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas Scientiarum. Agronomy Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011 manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 487-493, 2000.

FILHO, Fernando Francisco Gomes. **Reciclagem de Material Asfáltico Fresado Utilizando Solvente e Micro Emulsões**. 2009, 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte(UFRN) - RN, 2009. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15784/2/FernandoFGF\\_DISSE\\_RT\\_PARCIAL.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15784/2/FernandoFGF_DISSE_RT_PARCIAL.pdf)>. Acesso em: 25 de jul de 2018.

FLATOUT. **Camadas dos Pavimentos**.2018.Disponível em:<[www.flatout.com.br](http://www.flatout.com.br)>. Acesso em: 22 de Jun de 2018.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4 Ed. São Paulo: Atlas S/A. 2002.

GONÇALVES, Fernando Pugliero. **Estudo Experimental do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir da Instrumentação e Ensaio Acelerados**. 2002. p.467. Tese de Doutorado UFRGS- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2002. Disponível em <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2300/000367657.pdf>>. Acesso em: 23 de Set de 2018.

HILÁRIO, Ronderson Queiroz. **Uso de Pavimento Reciclado Adicionado com Cimento Para Uso Como Reforço de Base Para Rodovias: Estudo de Caso BR 120**. 2016, 163 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) Minas Gerais, 2009. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/7036/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_UsoPavimentoReciclado.pdf](http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/7036/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_UsoPavimentoReciclado.pdf)>. Acesso em: 25 de jul de 2018.

INOVA.**Pavimento flexível (corte transversal)**. 2015. Disponível em: <<http://www.inovacivil.com.br>>. Acesso em 22 de Jun de 2018.

MAQ BLOCOS. **Espaçador Caranguejo**. 2015. Disponível em: <<https://www.maqblocos.com.br>>.Acesso em 28 de Jun de 2018.

MOURA, Edson. **Transportes E Obras De Terra: Movimento de Terra e Pavimentação**. São Paulo. 2014. Disponível em: <[http://www.professoredmoura.com.br/download/Apost\\_Dimens\\_Pav\\_2\\_2014-Parte\\_A.pdf](http://www.professoredmoura.com.br/download/Apost_Dimens_Pav_2_2014-Parte_A.pdf)>. Acesso em: 20 de Set de 2018.

NÚCLEO DO CONHECIMENTO. **Tipos de Solos nos Pavimentos**. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br>>. Acesso em: 22 de Jun de 2018.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos** (2ª Edição). São Paulo: Oficina de Texto, 2002

PINTO, Salomão; PINTO, Isaac Eduardo – **Pavimentação Asfáltica**, Rio de Janeiro, 1989.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 4. ed. São Paulo: Zicurate, 2008.

SENÇO, Wlastermiller de, 1929 – **Manual de técnicas de pavimentação**, vol.1, 2.ed, São Paulo: Pini, 2007.

SKYSCRAPER. **Pavimento Sobre-Laje em Tabuleiro de Obras Especiais**. 2017. Disponível em: <<https://www.skyscrapercity.com>>. Acesso em 22 de Jun de 2018.

SOLUÇÕES PARA AS CIDADES. **Concreto Simples**. 2017. Disponível em: <<http://http://solucoesparacidades.com.br/mobilidade/>>. Acesso em 22 de Jun de 2018.

TSENG, Ester. **Reciclagem Total de Pavimentos de Concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do rodoanel metropolitano Mário Covas**. 2010. 220 f. São Paulo. Dissertação de Mestrado. 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-20102010-164010/pt-br.php>>. Acesso em: 22 de Set de 2018.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: USP, 1977.

ZENI, Fabiana. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Para Restauração de Rodovias com Adição da Camada de Base e Sub-base no Estudo de Caso da Rodovia SC 453, Trecho Tangará e Luzerna, em Santa Catarina**. 2016, 92 f. Monografia – Universidade Alto Vale do Rio do Peixe- UNIARP. Santa Catarina- SC, 2016. Disponível em: <<file:///D:/DOCUMENTOS/Downloads/Reciclagem%20de%20pavimentos%20rodovi%C3%A1rios%20flex%C3%ADveis%20para%20restaura%C3%A7%C3%A3o%20de%20rodovias%20com%20adi%C3%A7%C3%A3o%20da%20chamada%20de%20base.Fabiana%20Zeni.2016%201.pdf>>. Acesso em: 25 de Set de 2018.