

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

DEIVID CONCEIÇÃO DE SOUZA

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador: Prof. Especialista Eng. Civil
LINCOLN SALGADO**

CASCADEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

DEIVID CONCEIÇÃO DE SOUZA

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL
DIMENSIONADA COM A UTILIZAÇÃO DE BRITA GRADUADA SIMPLES E
BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO PARA AS CAMADAS DE
BASE GRANULAR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor Especialista Eng. Civil LINCOLN SALGADO.

BANCA EXAMINADORA

Orientador Professor **Especialista Eng. Civil LINCOLN SALGADO**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil

Professora **Ma. Eng. Civil Andrea Resende Souza**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheira civil

Professor (a) **Me. Eng. Civil Guilherme Irineu Venson**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil

Cascavel, 05 de junho de 2017.

RESUMO

Resumo geral do projeto com ênfase na metodologia e nos resultados esperados: Os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizam regularmente camadas de bases destes a brita graduada simples e a brita graduada tratada com cimento são alguns dos materiais granulares utilizados, assim, tendo em vista a utilização racional de materiais, a proposta é avaliar o dimensionamento destas camadas com diferentes valores para o número de passagens de um eixo padrão. A diferença de espessuras pode refletir em diminuição de custos, mesmo considerando a adição de valores ao utilizar cimento na composição do material. Esta abordagem visa principalmente, obter este parâmetro de comparação, para tanto, serão dimensionados dois pavimentos, cada um com a utilização de um material e três valores para o número de passagens de um eixo padrão, estes dimensionamentos serão efetuados experimentalmente a fim de fornecer subsídios para a análise de custos.

Palavra – Chave: Espessura, Dimensionamento, DNIT, CBR, Custo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espessura total do pavimento, em função de N e de IS ou CBR.....	30
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficiente de equivalência estrutural.....	32
Tabela 2: composição granulométrica da brita graduada.	34
Tabela 3: Dosagem brita graduada simples.....	35
Tabela 4: Dosagem brita graduada simples.....	35
Tabela 5: Dosagem brita graduada tratada com cimento	36
Tabela 6: Dosagem brita graduada tratada com cimento	36
Tabela 7: Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	38
Tabela 8: Dimensionamento para $N=5 \times 10^6$	38
Tabela 9: Resultado das espessuras das camadas BGS e BGTC para $N=5 \times 10^6$	39
Tabela 10: Dimensionamento para $N=5 \times 10^7$	40
Tabela 11: Resultado das espessuras das camadas BGS e BGTC para $N=5 \times 10^7$	40
Tabela 12: Dimensionamento para $N=5 \times 10^8$	41
Tabela 13: Resultado das espessuras das camadas BGS e BGTC para $N=5 \times 10^8$	41
Tabela 14: Descrição de Custos para BGS e $N=5 \times 10^6$	42
Tabela 15: Descrição de Custos para BGS e $N=5 \times 10^7$	42
Tabela 16: Descrição de Custos para BGS e $N=5 \times 10^8$	42
Tabela 17: Descrição de Custos para BGTC e $N=5 \times 10^6$	42
Tabela 18: Descrição de Custos para BGTC e $N=5 \times 10^7$	43
Tabela 19: Descrição de Custos para BGTC e $N=5 \times 10^8$	43

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO	8
1.1 INTRODUÇÃO	8
1.2 OBJETIVOS	9
1.2.1 Objetivo Geral.....	9
1.2.2 Objetivos Específicos	9
1.3 JUSTIFICATIVA	9
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	10
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE.....	10
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	10
2 CAPÍTULO	11
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1.1 Importância do Transporte Rodoviário	11
2.1.2 Pavimentos Rodoviários	11
2.1.3 Pavimento Flexível	13
2.1.4 Carregamentos	17
2.1.5 Dimensionamento	18
2.1.6 Granulometria	21
2.1.7 Materiais	22
3 CAPÍTULO	26
3.1 METODOLOGIA	26
3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa.....	26
3.1.2 Caracterização da Amostra	26
3.1.3 Coleta e Análise de Dados	26
3.1.4 Ensaios	27
3.1.4.1 Pavimentação - Brita Graduada Simples DER/PR ESP-P 05/05	27

3.1.4.2 Pavimentação - Brita Graduada simples Tratada com Cimento DER/PR.....	27
3.1.4.3 Determinação do Índice de Suporte Califórnia NORMA DNIT 172/2016.....	28
3.1.5 Dimensionamento de Pavimentos Pelo Método Empírico	29
3.1.6 Análise de Dados	333
3.1.7 Análise dos custos.....	333
4 CAPÍTULO	344
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	344
4.1.1. Dosagens	344
4.1.2 CBR	38
4.1.3 – Dimensionamentos pelo método do DNER.....	39
4.1.4 – Análise de custos	43
5 CAPÍTULO	444
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	444
6 CAPÍTULO	455
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	455
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	466

1 CAPÍTULO

1.1 INTRODUÇÃO

Atualmente os pavimentos rodoviários são denominados como rígidos, semirrígidos e flexíveis. O pavimento flexível, onde será abordado a análise desse trabalho, de acordo com o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo composto de pedregulhos, revestida por uma camada asfáltica.

Pavimentos flexíveis são formados por camadas que não trabalham à tração, e têm a função de distribuir a carga de suporte. Estas camadas são formadas geralmente por materiais granulares, os materiais de melhor qualidade ficam mais próximos da superfície (NECKEL, 2008).

A brita graduada simples (BGS) é um dos materiais granulares mais utilizados e a brita graduada tratada com cimento (BGTC) faz parte dos materiais cimentados mais frequentes em execução de pavimentos rodoviários, materiais que receberão uma correta dosagem granulométrica para serem abordados, analisados e comparados nesse trabalho, juntamente com três diferentes valores N, número de passagens de um eixo padrão de 8,2 toneladas.

O principal meio para o deslocamento de cargas dentro do Brasil é o transporte rodoviário, sendo também uma das principais formas para o desenvolvimento econômico do País. Apesar de nosso país possuir uma das mais extensas malhas rodoviárias do mundo, ainda necessita de novas rodovias sendo que grande parte das construídas ainda não estão pavimentadas e outras em mau estado de conservação, gerando de certo modo preocupações no setor econômico na área de construção civil rodoviária, sendo o pavimento um dos componentes de maior custo do projeto rodoviário.

As múltiplas camadas que compõe a estrutura de um pavimento flexível tem a função de resistir com eficiência às forças provocadas pelo tráfego rodoviário e do clima. Desta forma, a análise da estrutura de um pavimento flexível dimensionada com a utilização de brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento para as camadas de base granular e diferentes valores para o número de passagens de um eixo padrão fornecera a diferença de custos e espessuras das camadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a estrutura de um pavimento flexível dimensionado com brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento para as camadas de base granular, com diferentes valores para o número de passagens de um eixo padrão.

1.2.2 Objetivos Específicos

Obter a dosagem da brita graduada simples e da brita graduada tratada com cimento;

Verificar em laboratório as resistências mecânicas da brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento;

Dimensionar pavimento flexível para utilização da brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento;

Comparar as estruturas e os custos entre o pavimento flexível com a brita graduada simples e a brita graduada tratada com cimento.

1.3 JUSTIFICATIVA

Um pavimento mal projetado pode gerar prejuízos econômicos tanto de forma imediata como também com o decorrer do tempo, com o uso inadequado de materiais que podem gerar elevações nos custos de manutenção e nos custos operacionais dos veículos que utilizam a via. Além disso, a atual situação econômica do Brasil que apresenta escassez de recursos para investimentos em infraestrutura e sua dependência do modal rodoviário para o desenvolvimento torna as pesquisas em tecnologias envolvidas na pavimentação um item muito importante para a economia do país.

A pavimentação tem a função de melhorar as condições operacionais, trazendo conforto e segurança à população, mas sabemos o quanto é difícil melhorar o desempenho dos pavimentos tornando-se uma atividade complexa para engenheiros e técnicos. De acordo com Rodrigues (1997), a engenharia de pavimentação moderna envolve a concepção, o projeto, a construção, a manutenção e a avaliação de pavimentos dentro de fatores e condicionantes técnicos, econômicos, operacionais e sociais.

A estrutura básica de um pavimento é composta por camadas sobrepostas de materiais compactados, camadas granulares de base e sub-base são componentes essenciais para o

desempenho de pavimentos flexíveis. Sua função principal é a de reduzir as tensões provocadas pelas cargas repetidas do tráfego e transmiti-las ao subleito.

. De maneira geral, os materiais para pavimentação quando compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI, *et al*, 2008).

Portanto, para um pavimento com espessura e custo adequado, merece que seja realizado estudos minuciosos do assunto, comparando materiais com o objetivo de melhorar o desempenho da pavimentação. Estudos que tendem a propiciar informações capaz de auxiliar no processo de decisões, otimizando a relação custo-benefício, conforto ao rolamento e segurança do usuário.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Qual a diferença de custos e das espessuras das camadas de base granular utilizando brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento para essas camadas de base granular de um pavimento flexível com diferentes valores de cálculo para o número de passagens de um eixo padrão?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Por mais que a brita graduada tratada com cimento inicialmente apresente um valor superior a brita graduada simples, as diferenças de espessura nas camadas de base vão refletir o real custo do pavimento flexível, com isto espera-se obter melhor rendimento financeiro com a menor espessura da camada de base do pavimento flexível realizado com brita graduada tratada com cimento

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será limitada ao levantamento de dados, tais como as espessuras das diferentes camadas de dois pavimentos flexível localizado no estado do Paraná, sendo que um deles utilizando brita graduado simples e o outro brita graduada tratada com cimento. O estudo também limita-se ao levantamento dos custos para comparar as duas diferentes camadas na utilização dos dois materiais.

2 CAPÍTULO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Importância do Transporte Rodoviário

Ao tratar - se de pavimentação rodoviária descobrimos o quão importante é a sua influência para os aspectos econômicos do país. O sistema de transporte rodoviário, segundo Ramalho (2009), é fundamental para a economia do país, sem os mesmo, um produto dificilmente chegaria ao seu destino final, as indústrias mal funcionariam, pois não teriam acesso a uma grande parte da matéria prima, e consequentemente, não teriam as condições de escoar sua produção.

Para Rodrigues (2005), o transporte rodoviário é um dos mais simples e eficientes, sua única exigência é a existência de rodovias e sua grande vantagem é que permite o estabelecimento de rotas flexíveis, trata-se de um importante modal na realização das atividades porta a porta.

O desenvolvimento econômico político e social de um país estão ligados ao seu sistema de transportes. Para Ramalho (2009), o modal rodoviário é fundamental para o acesso de produtos e passageiros aos principais pontos de coleta e distribuição, garantindo assim, a integração entre portos, ferrovias, hidrovias e aeroportos.

Em razão das características do território nacional, e da necessidade de solidificação de seu desenvolvimento econômico, é fundamental para o país conservar e ampliar sua malha rodoviária, de modo que garanta o aumento do nível de serviço do transporte à redução de índices de acidentes e, consequentemente, reduzir os custos (CNT, 2007).

2.1.2 Pavimentos Rodoviários

Segundo a NBR 7207/82 (1982) e Senço (1997), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem e tem como funções resistir e distribuir os esforços verticais produzidos pelo tráfego, ao subleito, proporcionar conforto, segurança e comodidade no rolamento e resistir os esforços horizontais na superfície de rolamento.

Tem-se por pavimento uma estrutura de múltiplas camadas de determinadas espessuras, construída sobre uma obra de terraplanagem finalizada, com finalidade técnica e econômica,

além de resistir aos esforços provenientes do clima e principalmente do tráfego, a fim de proporcionar conforto aos usuários, melhoria das condições de rolamento, economia e segurança (BERNUCCI *et al*, 2010).

Segundo Pinto et al (2002), pavimento rodoviário é uma estrutura constituída por uma ou mais camadas, como características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuídas de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura.

O pavimento é estrutura projetada para suportar impactos provocados pelo tráfego de veículos automotores pelas variações climáticas e pelas chuvas, oferecendo, assim condições de conforto e segurança aos usuários (CNT, 2007).

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Mais recentemente há uma tendência de usar se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento (BERNUCCI *et al*, 2010).

De uma forma geral, os pavimentos rodoviários são classificados em três tipos (BRASIL, 2006, p. 95):

- a) flexíveis são caracterizados pelo fato de que todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas com a aplicação de carga. São executados tipicamente com base de brita revestida com camada asfáltica;
- b) semirrígidos são caracterizados pela camada de base ser com algum tipo de aglutinante com propriedades cimentícias, como camada de solo-cimento revestida por uma camada de asfalto;
- c) rígidos são constituídos tipicamente com camada de revestimento à base de lajes de concreto de cimento Portland. As tensões provenientes do carregamento são praticamente absorvidas por esta camada.

Abordaremos aqui sobre pavimentos flexíveis, porém, a literatura menciona ainda a existência dos pavimentos ditos semirrígido com algumas características semelhantes ao pavimento flexível onde são caracterizados por uma base cimentada, por algum aglutinante com propriedades cimentícias e por uma camada de revestimento com características flexíveis (BRASIL, 2006a).

2.1.3 Pavimento Flexível

O pavimento flexível, aonde será abordado a análise desse trabalho, de acordo com o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Exemplo típico: pavimento constituído por uma base de brita (brita graduada, macadame) ou por uma base de solo com pedregulhos, revestida por uma camada asfáltica.

Pavimentos flexíveis são formados por camadas que não trabalham à tração, e têm a função de distribuir a carga de suporte. Estas camadas são formadas geralmente por materiais granulares, os materiais de melhor qualidade ficam mais próximos da superfície (NECKEL, 2008).

Os pavimentos flexíveis são aqueles que sofrem deformações, porém estas deformações até certo limite, não levam a ruptura da estrutura. Esse tipo de pavimento é dimensionado a compressão e tração na flexão, e os carregamentos provocados pelo tráfego dão origem a bacias de deformações, o que leva a estrutura a deformações permanentes e ao rompimento por fadiga (SENÇO, 1997).

Os pavimentos flexíveis diferem-se dos rígidos não apenas pela característica do revestimento, mas principalmente pela forma como distribuem os esforços para as camadas inferiores. Para Yoder e Witczak (1975, APUAL JORGE 2008), “nos pavimentos flexíveis existe uma concentração dos esforços nos pontos de aplicação das cargas, ou seja, as tensões são distribuídas em uma área relativamente pequena”. Desse modo, existe a concentração dos esforços nos pontos em que são aplicados, o que gera um acúmulo de esforços pontuais que desgastam a estrutura.

Geralmente os pavimentos flexíveis são constituídos das seguintes camadas: revestimento flexível, base, sub-base, reforço de subleito, adotado no caso de subleitos com baixa capacidade de suporte e regularização o subleito.

BRASIL (2006a, p. 95) ao abordar sobre pavimento faz a seguinte definição:

O pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas com espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito.

Quanto às camadas constituintes de um pavimento, Senço (1997, p. 15), faz a seguinte afirmação:

Uma seção típica transversal de um pavimento - com todas as camadas possíveis – consta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por um dos inúmeros métodos de dimensionamento.

Os termos rígido e flexível compreendem as reações estruturais dos materiais isoladamente como também as respostas estruturais do pavimento como um todo. Logo, descreve o desempenho do pavimento sobre ações de esforços externos (BALBO, 2007).

O revestimento, também chamado de capa, é considerado a camada mais nobre do pavimento. Segundo Brasil (2006a, p.106), “o revestimento é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste”.

Para Marques, (2007) o revestimento é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e serve para melhorar as condições da via, proporcionando conforto e segurança. Deve resistir ao desgaste e aos esforços atuantes

Para Pinto e Preussler (2002, p.18), “a camada de revestimento de uma estrutura flexível consiste de uma mistura de agregados minerais e materiais betuminosos, sobreposta à camada de base”. Esta mistura deve apresentar características de estabilidade e flexibilidade compatíveis ao funcionamento elástico das demais camadas da estrutura, garantindo o conjunto de comportará de forma uniforme. Normalmente a camada de revestimento é responsabilizada pelo surgimento de problemas no pavimento, por ser a camada superficial e visível da estrutura, porém o revestimento se rompe pela deformação excessiva e fadiga das camadas inferiores em decorrência do tráfego.

A Base de um pavimento flexível é uma a camada acima da sub-base destinada a resistir e distribuir os esforços provenientes do tráfego, sobre a qual será construída a camada de revestimento. A camada de base tem basicamente a função de oferecer um suporte estrutural ao pavimento, garantindo a rigidez necessária para evitar o seu rompimento por fadiga e garantir que a grandeza das tensões de flexão no revestimento não leve ao seu trincamento prematuro (PINTO; PREUSSLER, 2002).

A base conforme afirma Marques (2007), é a camada que resiste os esforços da superfície de rolamento e distribui ao subleito, devendo ter um ISC maior que 60%.

As camadas de base e sub-base tem a função de resistir aos esforços transmitidos pelas camadas superiores além de servir de camada drenante e controlar a capilaridade da água. A sub-base tem ainda por função, corrigir a camada de subleito (BAPTISTA, 1978).

Balbo (2007) afirma que para a camada de base e sub-base podem ser empregados materiais como solo estabilizado naturalmente, solo – brita (mistura de solos e agregados), brita graduada tratada com cimento, brita graduada, solos estabilizados quimicamente com ligantes asfálticos ou hidráulicos.

A sub-base de um pavimento flexível é uma camada situada imediatamente acima do subleito que tem por objetivo complementar a camada de base, quando por condições técnicas e econômicas não for aconselhável à execução da mesma diretamente sobre a camada de regularização ou sobre o reforço do subleito.

A sub-base é a camada que complementa a base, no caso de não ser possível executar a base diretamente no subleito regularizado ou reforço. Deve ter ISC maior que 20% (NECKEL, 2008).

Segundo Pinto e Preussler (2002, p. 14), “a sub-base deve ter estabilidade e capacidade de suporte, ótima capacidade para drenar água acumulada e reduzida suscetibilidade às variações volumétricas”.

O material empregado pode ser granular ou coesivo, porém devem ter características geotécnicas superiores às do material do reforço e inferiores às do material empregado na camada de base.

Reforço de Subleito é uma camada do pavimento flexível de espessura constante, aplicada por condições técnicas e econômicas, sobre o subleito regularizado. O material utilizado deve possuir características geotécnicas superiores as da camada que o antecede e inferiores as da camada que irá procedê-lo. É normalmente constituído de material com caráter argiloso de boas características físicas e elevada resistência mecânica. Essas condições garantem uma capacidade de suporte melhor que a do subleito, resistência de forma a absorver e distribuir as cargas que são transmitidas ao longo das camadas superiores do pavimento (PINTO; PREUSSLER, 2002).

O subleito é a chamada fundação onde a estrutura do pavimento será executada. Ele pode ser o leito de uma rodovia existente não pavimentada, que receberá serviços que a deixe em condições de receber a estrutura proposta, ou um terreno virgem onde será implantada uma rodovia.

Para Balbo (2007), o subleito é constituído de material natural, consolidado e compactado, ou pode ser composto também por material transportado e após ser compactado.

Em qualquer caso do semi-espço finito, apenas a camada próxima da superfície é considerada subleito, pois, à medida que se aprofunda no maciço, as pressões exercidas são reduzidas a ponto de serem consideradas desprezíveis (SENÇO, 1997, p. 15). Desse modo, é considerado como subleito, a camada cuja profundidade varia de 0,60m a 1,50m, a partir do greide projetado.

Subleito é o terreno onde o pavimento será assentado. Deve-se estudar até a profundidade onde as tensões irão atuar, geralmente entre 1,50m e 60,00m de profundidade, já se o ISC for maior que 20% pode ser usado direto como sub-base (MARQUES, 2007).

Para Senço (1997, p.416), “O subleito recebe, na interface com o pavimento, uma pressão inferior à pressão de contato e tanto menor quanto mais espesso o pavimento e quanto mais nobres os materiais componentes desse pavimento”.

O reforço do subleito é uma camada de espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente que serve para melhorar a qualidade do subleito no caso deste ter ISC menor que 2% (MARQUES, 2007).

Segundo Senço (2007) as bases flexíveis são constituídas por:

Base de solo estabilizado: constituída de solo específico, com a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade, especificados previamente;

Base de macadame hidráulico: constituída de uma ou mais camadas de pedra britada, com a introdução de material de enchimento com a ajuda de água;

Base de brita graduada: mistura feita em usinas de agregados previamente dosado, contendo material de enchimento, água e cimento. Substitui a base de macadame hidráulico;

Base de macadame betuminoso: camadas de agregados interligados por pinturas de material betuminoso, sendo que o número de camadas depende da espessura determinada em projeto.

E por fim, o revestimento, recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, ou seja, é a camada superior destinada a proteger as camadas inferiores da deterioração causada pela ação do tráfego e agentes climáticos, tornando-as impermeáveis (TROMBETTA, 2010).

2.1.4 Carregamentos

De maneira geral, os materiais para pavimentação quando compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI, *et al*, 2008).

Para a seleção e a caracterização dos agregados, emprega-se tecnologia tradicional, pautada principalmente na distribuição granulométrica e na resistência dos grãos (NBR 11806/91).

A engenharia rodoviária considera como solo todo material que possa ser escavado a pá, picareta ou escavadeira sem a necessidade do emprego de explosivos (BRASIL, 2006a).

Quando o pavimento é solicitado por uma carga de veículo que se desloca com uma determinada velocidade, recebe uma tensão vertical (de compressão) e uma tensão horizontal (de cisalhamento) (SANTANA, 1993).

De acordo com Pinto e Preussler (2002, p.7), “As variações entre os acréscimos de cargas por eixo e os correspondentes efeitos de destruição do pavimento ocorrem de forma exponencial...”. Desta forma, torna-se imprescindível que os órgãos rodoviários façam o devido controle dos pesos por eixo a fim de garantir a durabilidade dos pavimentos em uso.

Em estudos desenvolvidos pela Protos Engenharia a respeito do “Reflexo do Excesso de Carga por Eixo na Vida Útil do Pavimento”, pode-se dar origem a uma curva que representa a redução na vida útil do pavimento em função do acréscimo de carga por eixo, onde fica claro que a sobrecarga influencia de forma considerável na durabilidade da estrutura (PREUSSLER, 2002).

Segundo Medina (1997), perde-se o sentido a definição das camadas quanto às suas funções específicas e distintas umas das outras, à medida que se passou a analisar o pavimento como um sistema de camadas e a calcular as tensões e deformações. A partir daí começou-se a considerar a absorção dos esforços de tração pelas camadas de rigidez como o concreto asfáltico.

Ainda, segundo Medina (1997), “A mecânica dos pavimentos é uma disciplina da engenharia civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos a cargas dos veículos. Faz-se o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, conhecidos os parâmetros de deformabilidade, geralmente com a utilização de programas de computação. Verifica-se o número de aplicações de carga que leva o revestimento asfáltico ou a camada cimentada à ruptura por fadiga”.

Segundo Medina e Motta (2005) o estado de tensões em um elemento do subleito ou camada do pavimento varia com a posição da carga móvel. Quando esta se posiciona verticalmente acima do elemento, têm-se as tensões normais principais horizontais e verticais.

De acordo com Rodrigues (1998), um pavimento dificilmente sofre ruptura catastrófica, a menos que haja erro de projeto geotécnico em casos como os de pavimentos assentes em aterros sobre solos moles. A sua degradação se dá de forma contínua, ao longo do tempo, por meio de mecanismos complexos e ainda não inteiramente equacionados, onde gradativamente vão se acumulando deformações plásticas e trincas nas camadas, decorrentes de uma combinação entre a ação das cargas do tráfego e os efeitos do intemperismo.

As principais causas que geram problemas em estradas de terras são a falta de capacidade do subleito, o mau desempenho da superfície de rolamento, a deficiência do sistema de drenagem. Com isso geram problemas como ondulações, rodeiros, atoleiros, excesso de pó, pista com baixa aderência, segregação lateral, buracos e erosões (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A., 1988).

Segundo Lovato (2004, p. 35) quando o pavimento é submetido ao carregamento, as microfissuras surgem em níveis de deformação de extensão em média 25% da deformação de extensão de ruptura, chegando a valores de 30 a 60 microstrain ($\mu\epsilon$), dependendo da resistência da camada. Apesar da presença de microfissuras, a camada cimentada ainda permanece intacta e apresenta uma resistência a compressão simples muito elevada, porém, a resistência à tração deve ser avaliada, pois a camada rompe a tração.

2.1.5 Dimensionamento

Segundo Bernucci *et al* (2008), para o dimensionamento de estruturas de pavimentos, utilizam-se no país principalmente dois parâmetros de caracterização mecânica: o Índice de Suporte Califórnia (ISC), usado no dimensionamento convencional do DNER e o Módulo de Resiliência (MR) usado na Mecânica dos Pavimentos.

O dimensionamento estrutural de um pavimento flexível tem sido feito aplicando-se métodos de origem empírica, como o Método do DNER (1981) e o Guia da AASHTO (1986), que definem a espessura total necessária para que as camadas de subleito e de reforço do subleito sejam adequadamente protegidas contra a geração excessiva de deformações plásticas, ao mesmo tempo que estipulam, com base no tráfego de projeto, as espessuras mínimas das demais camadas, desde que os materiais empregados atendam a determinadas especificações.

O dimensionamento de um pavimento é feito em função do número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão, tratado nos cálculos como N, durante o período de projeto escolhido. O valor de N representa o número de passadas do eixo padrão sobre o pavimento em um período estimado de anos de utilização (DNIT, 2006).

De acordo com Rodrigues (1997), uma forma de se obter um dimensionamento menos conservativo contra deformações plásticas que o dado por métodos tradicionais de dimensionamento (ex.: método do DNER para projeto de pavimentos flexíveis) é prever-se o afundamento em trilha de roda que deve ocorrer durante o período de projeto através do somatório das deformações plásticas em cada camada ou subcamada.

Para obtenção dos elementos para dimensionamento do projeto, e análise da viabilidade econômica do projeto é necessário conhecer a projeção dos volumes de tráfego. As vias devem ser projetadas para que proporcionem um nível de serviço aceitável durante sua vida útil, e para isso deve ser determinado com maior grau de exatidão possível qual será o volume e a distribuição do tráfego para aquele período (BAPTISTA, 1978).

A espessura do material granular sobre o subleito é determinada em função do C.B.R. desse, e também do tráfego esperado. O dimensionamento do reforço se necessário, para um pavimento pode ser efetuado por meio do critério do C.B.R., considerando-se as seguintes condicionantes (BALBO, 2007):

Conhecimento dos materiais componentes do pavimento e de suas espessuras (avaliação estrutural);

Conhecimento das condições atuais de trabalho, em termos de C.B.R. do subleito, do reforço e da sub-base do pavimento (determinação de parâmetros de resistência e elasticidade atuais);

Redefinição dos coeficientes de equivalência estrutural das camadas componentes do pavimento em função das atuais condições encontradas para as camadas granulares e para as misturas asfálticas e cimentadas existentes.

O C.B.R. é um método empírico, porém com fundamento, devido às inúmeras experiências tanto de campo quanto de laboratório, que comprovam a sua eficiência, e por isso é o método mais empregado atualmente (BAPTISTA, 1978).

Franco (2007, p. 9) destaca que em um projeto de pavimento a sua estrutura é calcula de modo que possua condições operacionais adequadas no período de tempo estabelecido. Porém, essa condição operacional vai se degradando ao longo do tempo. A degradação acontece devido a problemas construtivos, pela própria passagem das cargas e por ações climáticas. Uma

solução que pode ser dada para este problema é a manutenção, que serve para elevar a qualidade da via até certo ponto.

Um dos fatores que altera significativamente a vida útil de um pavimento é a rigidez das camadas. Atualmente, diferentes fatores de rigidez estão sendo estudados e caracterizados para estabelecer o comportamento mecânico das misturas. Esse maior conhecimento da rigidez dos materiais de revestimento e subcamadas possibilita uma análise estrutural global do pavimento, produzindo como resposta tensões, deformações e deslocamentos do sistema em camadas (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 290).

De acordo com Brasil (2006, p. 49):

Até a década de 70, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por enfocar, basicamente, a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada através do valor do CBR. No entanto, observa-se que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída à fadiga dos materiais gerada pela contínua solicitação dinâmica do tráfego atuante. Esta realidade acabou por dar ensejo à introdução, no país, de estudos da resiliência de materiais empregáveis em pavimentos, permitindo, assim avaliar-se comportamentos estruturais até então não explicáveis pelos procedimentos clássicos e efetuar-se uma abordagem mais realista desta problemática no meio tropical.

American Society of Testing and Materials 8 (1979 apud BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 311-312) define fadiga como:

[...] o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos. Vale salientar que esse é um problema não-linear que ocorre em diversos materiais, ou seja, o dano produzido no primeiro ciclo é diferente do dano produzido no segundo ciclo e assim sucessivamente.

Em materiais asfálticos e cimentados, a fadiga ocorre pela repetição das cargas sobre o pavimento, gerando microfissuras que ocasionam perda de rigidez do material constituinte.

Essas microfissuras vão se alastrando por todo o pavimento, até o ponto em que o material não resiste e rompe. (FRANCO, 2007, p. 189).

As fissuras por fadiga se manifestam tanto na superfície do revestimento asfáltico como na estrutura não aparente de bases cimentadas, em todos os casos, de maneira intensa e peculiar. Nas misturas asfálticas, o agente ligante, que possui natureza dúctil, suporta deformações plásticas significativas antes de romper, porém, tais deformações apresentam limites a partir dos quais qualquer nível superior começa causar microfissuras na estrutura do material. Já nas bases cimentadas, o cimento trabalha sob a forma de ligações pontuais entre partículas ou na formação de um esqueleto que fixa as partículas com dimensões menores, dessa forma, estão sujeitas ao fenômeno da fadiga quando os cristais resultantes da hidratação do cimento, de natureza frágil, sofrem progressivas microfissuras, não guardando deformações plásticas elevadas (BALBO, 2007, p. 262-263).

Com base no trabalho desenvolvido por Porter, na década de 50, o engenheiro Murillo Lopes de Souza introduziu no Brasil um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, cujo mesmo foi oficializado em 1961 pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens como sendo o atualmente conhecido Método do DNER/1961. (BUZZATI, 1991).

A complexidade da estrutura do pavimento torna difícil a previsão do seu desempenho futuro. As necessidades futuras de manutenção só podem ser previstas dentro de um sistema de gerência de pavimentos que utilize modelos de previsão de desempenho com acurácia e confiabilidade (FRITZEN, 2005).

Existem vários modelos de previsão de desempenho para pavimentos baseados em premissas e condições de contorno diferenciadas. Eles são classificados usualmente de acordo com a origem em: empíricos; mecanísticos e mecanísticos-empíricos (VALE, 2008; HAAS *et al.*, 1994).

2.1.6 Granulometria

Os solos, em sua fase sólida, contêm partículas de diferentes tamanhos, nas mais variadas proporções. A determinação do tamanho e da ocorrência das partículas permite obter a função distribuição de partículas do solo e que é denominada distribuição granulométrica (SOARES *et al.*, 2006).

A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos, é obtida através do processo de peneiramento de uma amostra seca, enquanto que, para siltes e argilas

se utiliza a sedimentação dos sólidos no meio líquido. No caso de solos que tem partículas tanto na fração grossa (areia e pedregulho) quanto na fração fina (silte e argila) se torna necessária a análise granulométrica conjunta (SOARES *et al*, 2006).

Mesmo o solo não apresentando partículas esféricas sempre se usará a expressão diâmetro equivalente da partícula ou apenas diâmetro equivalente, quando se faz referência ao seu tamanho. Para os materiais granulares ou fração grossa do solo, o diâmetro equivalente será igual ao diâmetro da menor esfera que circunscreve a partícula, enquanto que para a fração fina este diâmetro é o calculado através da lei de Stokes, que é válida para movimento de partículas esféricas pequenas movendo-se em velocidades baixas (SOARES *et al*, 2006).

2.1.7 Materiais

Para Senço (2007), a construção de um pavimento envolve não somente o conhecimento dos materiais que constituem as camadas, mas também dos materiais que formam o subleito, destacando-se o solo que interfere diretamente em todos os estudos de um pavimento, uma vez que é o suporte da estrutura.

A penetração de um CAP é definida como a distância em décimos de milímetros que uma agulha padronizada penetra verticalmente em uma amostra de cimento asfáltico sob condições específicas de carga, tempo e temperatura. O Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) e o Departamento Nacional de Estradas de Rodagens (DNER) especificam 4 tipos de CAP, pela sua penetração: CAP 30-45; CAP 50-60; CAP 85-100 e CAP 150-200, e três tipos quanto à viscosidade: CAP 7; CAP 20 e CAP 55.

Os materiais cimentados mais frequentes são: brita graduada tratada com cimento (BGTC); solo-cimento; solo-cal; solo-cal-cimento; concreto rolado (CCR – concreto compactado a rolo). As misturas asfálticas são: solo-asfalto; solo-emulsão; macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado (BERNUCCI, L. B.; *et al*, 2008).

A brita graduada é obtida da britagem de rochas basálticas, gnáissicas ou calcárias, dependendo da geologia local (CARNIN *et al.*, 2004). Solo-cimento é o produto endurecido resultante da mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem racional, executada de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo. (ABCP, 1986).

Segundo o *Asphalt Institute* (1989) a quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90 a 95% em peso e 70 a 85% em volume e esta

parcela mineral é em parte a responsável pela capacidade de suporte de cargas dos revestimentos, influenciando assim o desempenho dos pavimentos. Na pavimentação asfáltica o agregado é também usado comumente na base e eventualmente na sub-base. Na pavimentação rígida o agregado é usado na confecção do concreto de cimento Portland.

De acordo com a NBR 9935, que determina a terminologia dos agregados, o termo “agregado” é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e concreto. Já Woods (1960) define agregado como sendo uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais, usada em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa, etc.

Segundo Roberts *et al* (1996), os agregados usados em construção rodoviária são largamente obtidos de depósitos de rochas naturais. As rochas naturais ocorrem como afloramentos ou próximo à superfície ou como depósitos de agregados ao longo de velhos extratos aluvionares. As rochas naturais são classificadas pelos geólogos em 3 grupos dependendo da sua origem: ígneas (magmáticas), sedimentares e metamórficas. Outros tipos de agregados que às vezes são usados em misturas a quente são os agregados leves, produzidos pelo aquecimento de argila a temperaturas muito altas e escórias, normalmente produzidas nos alto-fornos durante a produção de aço. Estes dois agregados artificiais produzem boa resistência ao escorregamento quando usados em misturas a quente.

Um dos efeitos mais importantes da mineralogia dos agregados no desempenho de misturas asfálticas segundo Roberts *et al* (1996) é a adesividade da película de asfalto à brita e a resistência ao descolamento por ação da água. A ligação entre o cimento asfáltico e os agregados é melhor com certos tipos de minerais. Num primeiro instante, o cimento asfáltico normalmente se liga melhor aos agregados “carbonatados” (calcário) que aos agregados “silicosos” (cascalhos).

Os agregados devem transmitir as cargas de rodas às camadas sobrejacentes por intermédio do atrito interno e também devem ser resistentes à abrasão e ao polimento devido ao tráfego. São sujeitos à fragmentação (quebra) e ao uso abrasivo durante sua produção, transporte e compactação das misturas asfálticas. Eles devem ser duros e tenazes para resistir a britagem, degradação e desintegração quando estocados, manipulados através de algum equipamento durante a produção de uma mistura asfáltica, espalhadas no pavimento, compactados com rolos e quando solicitados por caminhões (ROBERTS *et al* 1996).

Para uso em misturas asfálticas as partículas de agregados devem ser mais cúbicas que planas (chatas), finas ou alongadas. Em misturas compactadas, as partículas de forma angular

exibem um maior inter travamento e atrito interno, resultando conseqüentemente em uma maior estabilidade mecânica que partículas arredondadas. Por outro lado, misturas que contém partículas arredondadas, tais como a maioria dos cascalhos naturais e areias, tem uma melhor trabalhabilidade e requerem menor esforço de compactação para se obter a densidade requerida. Esta facilidade de compactar não constitui necessariamente uma vantagem, visto que as misturas que são mais fáceis de compactar durante a construção podem continuar a densificar sob ação do tráfego, levando à deformações permanentes devido aos baixos índices de vazios e fluxo plástico (ROBERTS *et al*, 1996).

Tanto a forma da partícula como a textura superficial também influencia na trabalhabilidade e na resistência da mistura asfáltica. Uma textura superficial rugosa, como uma lixa, encontrada na maioria das rochas britadas tende a aumentar a resistência e requerem cimento asfáltico adicional para superar a perda de trabalhabilidade, quando comparada com agregados de superfícies lisas como cascalhos e areias de rio. Vazios na massa compactada de agregados de textura rugosa também são normalmente altos produzindo espaço adicional para o cimento asfáltico. Agregados de textura lisa podem ser mais facilmente cobertos pelo filme asfáltico, mas o cimento asfáltico forma usualmente ligações mecânicas mais fortes com os agregados de textura rugosa (ROBERTS *et al*, 1996).

A maioria das misturas betuminosas contém vários agregados diferentes (pedregulho, areia, filer, etc.) que são combinados para encontrar a graduação desejada. Usualmente, estes agregados têm densidades específicas diferentes que necessitam serem combinados para determinar as relações peso-volume das misturas. (ROBERTS *et al* 1996).

Para ROBERTS *et al* (1996) a melhor graduação para uma mistura betuminosa é aquela que proporcione um arranjo das partículas mais denso. Com a máxima densidade ter-se-á aumento na estabilidade, através do aumento dos contatos inter partículas e se reduziria os vazios no agregado mineral. Porém, deverão existir suficientes espaços vazios para permitir que o cimento asfáltico seja incorporado para assegurar durabilidade e para evitar exsudação e/ou afundamento. Misturas densas também são mais sensíveis a pequenas variações do teor de asfalto.

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia, também conhecido como ensaio e CBR, consiste na determinação da relação percentual entre a pressão necessária para se penetrar um pistão padronizado, em uma amostra de solo devidamente preparada e a pressão para que o mesmo pistão penetre a mesma profundidade, em uma amostra padrão de pedra britada (BRASIL, 1994d).

A escolha do tipo de pavimento e dos materiais a serem utilizados em determinada obra, está relacionada à minimização dos custos, já que este fator é um dos maiores limitantes na concepção de um projeto rodoviário para as agências e operadores viários. Em uma obra de pavimentação é de fundamental importância a pesquisa de materiais disponíveis nas proximidades, bem como de considerar a dificuldade de sua extração e transporte (BALBO, 2007, p. 16).

O revestimento é um dos principais elementos que formam os pavimentos asfálticos, pois irá receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática. Portanto, essa camada deve ser, tanto quanto possível, impermeável e resistente aos esforços de contato dos pneus com o pavimento (BERNUCCI et al., 2008, p. 157).

Um dos tipos de asfalto mais utilizado no Brasil é o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Trata-se do produto da mistura proporcional de agregados de diferentes granulometrias e cimento asfáltico. A mistura é aquecida à temperatura preestabelecida em função da característica viscosidade-temperatura da mistura. As misturas podem ser dimensionadas e executadas com camadas distintas, contendo características e dosagem diferentes, garantindo maior resistência (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 158).

Brasil (2006, p. 96) descreve que as camadas de base e sub-base podem ser constituídas por solos, britas de rocha, escória de alto forno ou mistura desses materiais. Quando as camadas são puramente granulares, são classificadas como flexíveis e sua estabilização se deve à compactação apropriada, segundo especificações. Existem, ainda, bases e sub-bases com materiais misturados a elementos cimentados. Os mais frequentes são: BGTC, solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento e concreto compactado a rolo (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 352).

A BGTC é um material bastante frágil, apresentando pequenas deformações antes de romper. Além disso, é verificado um comportamento elástico-linear do material até cerca de dois terços da tensão de ruptura, sendo que esta ocorre bruscamente e sem grandes incrementos na deformação sofrida (BALBO, 1993, p. 78).

Balbo (1993, p. 106) define que para a camada de BGTC o Módulo de Resiliência ideal admitido é limitado em 15.000 MPa, considerando as dificuldades de se conseguir densidades próximas do limite inferior desta camada quando compactada monoliticamente

DNIT (2009) Brita Graduada Simples Mistura em usina, de produtos de britagem de rocha são que, nas proporções adequadas, resulta no enquadramento em uma faixa granulométrica contínua que, corretamente compactada, resulta em um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade.

3 CAPÍTULO

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Trata-se de uma análise da brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento para o dimensionamento da base ou sub-base de um pavimento flexível com três valores diferentes de passagens de um eixo padrão de 8,2 toneladas. Os ensaios de dosagens e determinação das resistências mecânicas foram efetuados no laboratório de materiais e estradas do Centro Universitário FAG.

3.1.2 Caracterização da Amostra

Para composição do traço de brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento foram utilizados agregados oriundos de uma mineradora situada no município de São Miguel do Iguaçu, além de cimento Portland tipo CP II-E.

3.1.3 Coleta e Análise de Dados

Os dados foram coletados através dos resultados obtidos após os ensaios de laboratório tendo como suporte as seguintes Normas de especificação; DNIT/2009 Pavimentação – Sub-base ou base de brita graduada simples - Especificação de serviço e DNIT/2015 Pavimentação – Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento - Especificação de serviço.

Os dados referente aos dimensionamentos das camadas de base, sub-base e reforço do subleito do pavimento flexível utilizando brita graduada simples e outro utilizando brita graduada tratada com cimento foram feitos pelo método empírico onde seus princípios são baseados em critérios de resistência e ruptura por cisalhamento, juntamente com a determinação do Índice de Suporte Califórnia, índice que dá subsídio ao dimensionamento de pavimentos flexíveis, de acordo com a Norma DNIT 172/2016 Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.

A composição e comparação dos custos unitários para os dois pavimentos projetados foi utilizado como base o Referencial de preços e serviços do DER – PR de outubro de 2016, sem a desoneração.

3.1.4 Ensaios

3.1.4.1 Pavimentação - Brita Graduada Simples DER/PR ESP-P 05/05

Os agregados utilizados, obtidos a partir da britagem e classificação de rocha são, foram constituídos por fragmentos duros, limpos e duráveis, livres de excesso de partículas lamelares ou alongadas, macias ou de fácil desintegração e de outras substâncias ou contaminações prejudiciais.

Quando submetidos à avaliação da durabilidade com solução de sulfato de sódio, em cinco ciclos, os agregados utilizados devem apresentar perdas inferiores aos respectivos limites, agregados graúdos 12% e agregados miúdos 15%.

A graduação do agregado foi a distribuição dos tamanhos de partículas expressa em porcentagem do peso total. A graduação foi obtida fazendo-se passar o material através de uma série de peneiras empilhadas com aberturas progressivamente menores, e pesando-se o material retido em cada uma.

Para o agregado retido na peneira número 10, a porcentagem de desgaste não deve ser superior a 50%. Aspectos particulares, relacionados a valores típicos para as perdas nesse ensaio, são abordados no Manual de Execução.

- A porcentagem de material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar a 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40;
- Para camadas de base, a porcentagem passante na peneira nº 40 não deve ser inferior a 12%;
- A diferença entre as porcentagens passantes nas peneiras nº 4 e nº 40 deve estar compreendida entre 20 e 30%;
- A fração passante na peneira nº 4 deve apresentar o equivalente de areia, determinado pelo método DNER-ME 54/97, superior a 40%;
- A porcentagem de grãos de forma defeituosa, obtida no ensaio de lamelaridade descrito no Manual de Execução, não deve ser superior a 20%.

3.1.4.2 Pavimentação - Brita Graduada simples Tratada com Cimento DER/PR ESP-P 16/05

A brita graduada tratada com cimento Portland tipo CP II-E foi enquadrada na faixa III da tabela de composição granulométrica, detalhada no capítulo 4 referente aos resultados e discussões. A porcentagem de material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar a 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40. A mistura de brita graduada tratada com cimento,

quando dosada e ensaiada, deve apresentar resistência à compressão simples, aos sete dias, mínima de 3,5 MPa e máxima de 8,0 MPa.

A rocha sã extraída da pedreira indicada, foi previamente britada e classificada em frações, definidas em função da granulometria para a mistura das frações obtidas, acumuladas nos silos da central de mistura, foi combinada com o cimento no misturador. Foi acrescentada no misturador a água necessária à condução da mistura de agregados à respectiva umidade ótima, mais o acréscimo destinado a fazer frente às perdas verificadas nas operações construtivas subsequentes.

3.1.4.3 Determinação do Índice de Suporte Califórnia NORMA DNIT 172/2016 – ME.

Para o ensaio foram moldados corpos de prova onde, fixa-se o molde à sua base metálica, ajusta-se o cilindro complementar e apoia-se o conjunto em uma base com massa igual ou superior a 90KG. O material foi compactado com um disco espaçador com fundo falso, em cinco camadas iguais, de forma a se ter uma altura total de solo de cerca de 12,5 cm após a compactação. Cada camada deve receber 12 golpes do soquete, no caso de material de subleito, 26 ou 55 golpes, nos casos de materiais de sub-base ou base, respectivamente, caindo de 45,72 cm, e distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada.

O cilindro complementar foi removido, tendo-se antes o cuidado de destacar, com o auxílio de uma espátula, o material a ele aderente. Com uma régua rígida biselada rasou-se o material na altura exata do molde e determinou-se, com aproximação de 5g, o peso do material úmido compactado. Retirou-se do material excedente da moldagem uma amostra representativa de cerca de 100g, para a determinação do teor de umidade. Pesou-se essa amostra que logo após foi secada em estufa a 105 °C – 110 °C, até constância de massa, e executou-se as pesagens novamente, com incerteza de 0,1g.

As operações foram repetidas para teores crescentes de umidade, utilizando-se amostras de solo não trabalhadas, tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação. Estes corpos de prova moldados foram utilizados nos ensaios de expansão e penetração.

Terminadas as moldagens necessárias para caracterizar a curva de compactação, o disco espaçador de cada corpo de prova foi retirado e os moldes foram invertidos e fixados nos respectivos pratos-base perfurados. Em cada corpo de prova, no espaço deixado pelo disco espaçador foi colocada a haste de expansão com os pesos anelares. Essa sobrecarga deve ter massa superior a 4,536 kg. Foi Adaptado, ainda, na haste de expansão, um extensômetro fixo ao tripé porta-extensômetro, colocado na borda superior do cilindro, destinado a medir as

expansões ocorridas, que foram anotadas de 24 em 24 horas, em porcentagens da altura inicial do corpo de prova. Os corpos de prova permaneceram imersos em água durante 96 horas (quatro dias). Terminado o período de embebição, cada molde com o corpo de prova foi retirado da imersão e deixado escoar a água durante 15 minutos. Findo esse tempo, o corpo de prova estava preparado para a penetração.

O ensaio de penetração foi realizado em uma prensa, para esse ensaio foram colocadas no topo de cada corpo de prova, dentro do molde cilíndrico, as mesmas sobrecargas utilizadas no ensaio de expansão. Esse conjunto foi levado ao prato da prensa e feito o assentamento do pistão de penetração no solo, por meio da aplicação de uma carga de, aproximadamente, 45N, controlada pelo deslocamento do ponteiro do extensômetro do anel dinamométrico; zeram-se, a seguir, o extensômetro do anel dinamométrico e o que mede a penetração do pistão no solo. Acionou-se a manivela da prensa (dispositivo micrométrico) com a velocidade de 1,27 mm/min. (0,05 pol/min.). Cada leitura considerada no extensômetro do anel foi a função de uma penetração do pistão no solo e de um tempo especificado para o ensaio.

3.1.5 Dimensionamento de Pavimentos Pelo Método Empírico

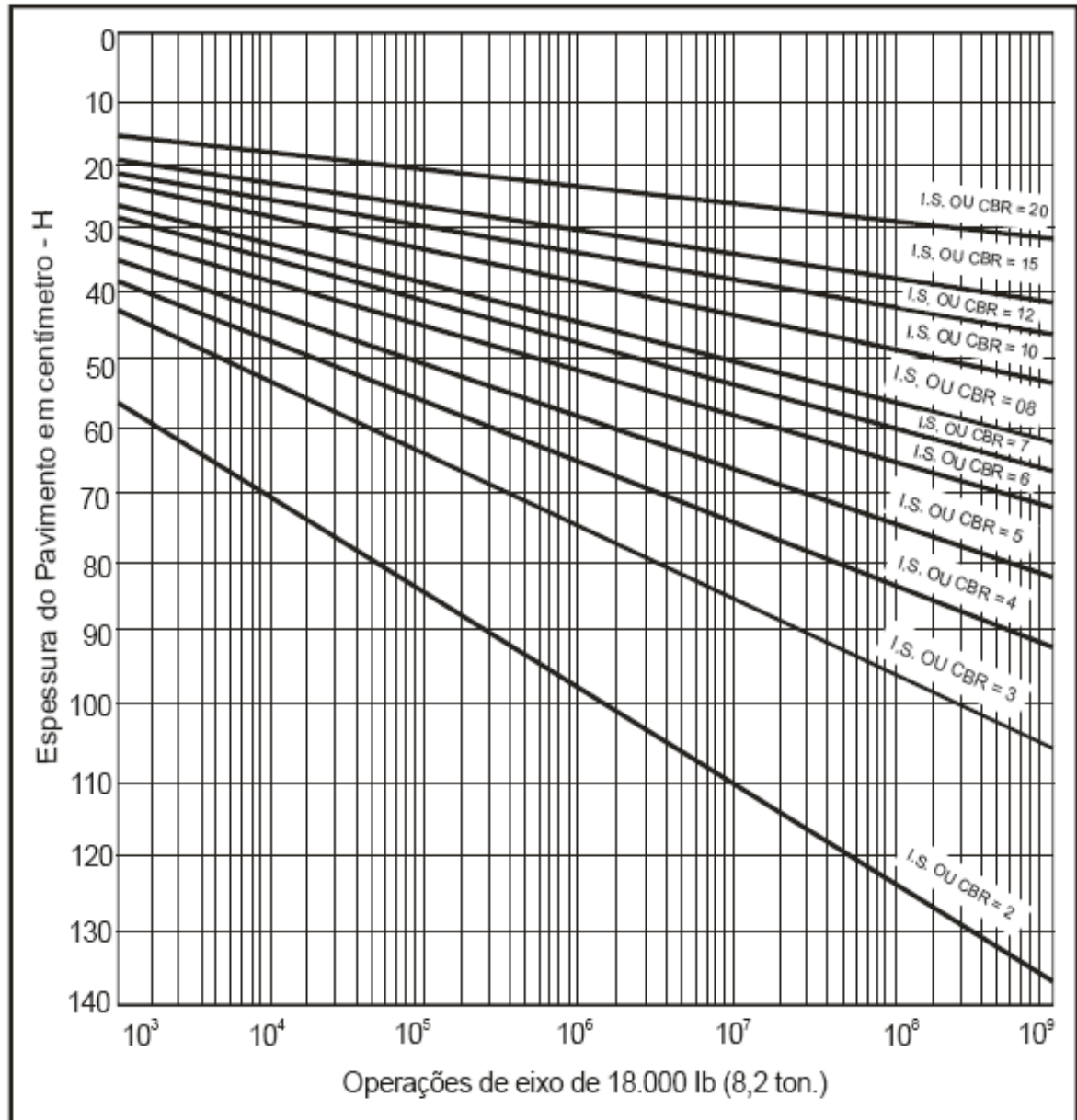
O dimensionamento de um pavimento é feito em função do número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão, tratado nos cálculos como N, durante o período de projeto escolhido. O valor de N representa o número de passadas do eixo padrão sobre o pavimento em um período estimado de anos de utilização (DNIT, 2006).

Quanto ao tráfego, o pavimento é dimensionado em função do número equivalente N de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido (DNIT, 2006). O dimensionamento foi realizado com $N = 5 \times 10^6$, $N = 5 \times 10^7$ e $N = 5 \times 10^8$ para o número de repetições de um eixo padrão e materiais com $\text{CBR} \geq 60\%$, visto que para este a norma para dimensionamento admite camada de rolamento em CBUQ, além de CBR de subleito em 12,47% conforme ensaio fornecido pela mesma construtora que forneceu os demais materiais e ensaio este que caracteriza o CBR da sede da empresa. Com isto a composição granulométrica da brita graduada foi enquadrada na terceira faixa da Tabela 2, situada no capítulo 4, resultados e discussões.

Para promover a comparação foram dimensionados dois pavimentos, um utilizando Brita Graduada simples e outro utilizando Brita Graduada tratada com cimento. Para tal dimensionamento foi utilizado a seguinte metodologia:

- Determinação de espessuras equivalentes de base granular ($K=1,0$), com a utilização do Ábaco expresso pela Figura 1.

Figura 1: Espessura total do pavimento, em função de N e de IS ou CBR



Fonte: Determinação das espessuras do pavimento (DNIT, 2006).

Entrando-se no eixo das abscissas com o valor de N, segue-se verticalmente até encontrar a reta representativa da capacidade de suporte CBR, depois, seguindo horizontalmente, encontra-se, no eixo das ordenadas, a espessura do pavimento. Esta espessura é fornecida em termos de material com $K = 1,00$, isto é, em termos de base granular (DNIT, 2006). Para obter maior precisão também utilizamos a equação (5) para encontrar esses dados;

- Brita padrão ou californiana (material de referência): $K=1,0$; $CBR=100\%$;

- $e = f(\text{IS ou CBR}, N) \rightarrow \text{Gráfico/Equação};$
- Camadas granulares: $e_{\min} \geq 10,0 \text{ cm};$
- Determinação das espessuras e equivalentes de base granular.

$$\text{IS}_{\text{SL}} \text{ ou } \text{CBR}_{\text{SL}} \rightarrow H_m$$

$$\text{IS}_{\text{REF}} \text{ ou } \text{CBR}_{\text{REF}} \rightarrow H_n$$

$$\text{CBR}_{20} (\text{sub-base}) \rightarrow H_{20}$$

- Resolução de Inequações 1; 2; 3 e das Equações 4 e 5.

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (1)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_s \geq H_n \quad (2)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_s + h_n \times K_{\text{REF}} \geq H_m \quad (3)$$

$$K_s = (\text{CBR} / 3 \times \text{CBR})^{1/3} \quad (4)$$

$$H = 77,67 \times N^{0,0482} \times \text{CBR}^{-0,598} \quad (5)$$

Onde:

R – espessura do revestimento.

K_R – coeficiente estrutural de revestimento.

B – espessura da base.

K_B – coeficiente estrutural de base.

K_s – coeficiente estrutural de sub-base.

K_{REF} – coeficiente estrutural de reforço.

H_{20} – espessura total da base + revestimento.

h_{20} – espessura da sub-base.

h_n – espessura do reforço do subleito.

H_{Ref} – espessura do revestimento + base + sub-base.

H_m – espessura do revestimento + base + sub-base + reforço do subleito.

H – espessura de determinadas partes do pavimento (H_{20} , H_{Ref} , H_m).

N – número de passagens do eixo padrão.

CBR – índice de suporte.

Determinamos as espessuras H_m , H_n , H_{20} , pelo ábaco expresso pela Figura 1 onde a espessura do pavimento dada em centímetros é a relação logaritma do eixo padrão de 8,2 toneladas pelo índice CBR. Além do ábaco, também utilizamos a equação (5) para expressar resultados mais precisos.

$$H = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (5)$$

Em relação aos coeficientes de equivalência estrutural, utilizamos $K_s = 1$ para a base granular de acordo com a Tabela 1. Coeficiente de equivalência estrutural. Para a sub-base granular e reforço do subleito, utilizamos os coeficientes calculados em função da relação entre o CBR dessas camadas e o CBR do subleito, expressa pela equação (4):

$$K_s = (CBR_{\text{sub-base}} / 3 \times CBR_{\text{subleito}})^{1/3} \quad (4)$$

Tabela 1: Coeficiente de equivalência estrutural.

Componentes dos pavimentos	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento por penetração	1,20
<u>Base granular</u>	<u>1,00</u>
Sub-base granular	0,77(1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 Kg/cm ²	1,70
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 Kg/cm ² e 28 Kg/cm ²	1,40
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 Kg/cm ² e 21 Kg/cm ²	1,20
Bases de Solo-Cal	1,20

Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT 2006).

3.1.6 Análise de Dados

Após dimensionado os dois pavimentos, foram analisadas as espessuras equivalente de cada camada, para tanto foi utilizado um ensaio de CBR.

A análise de dados referentes à resistência mecânica, ao dimensionamento e aos custos de ambos os pavimentos forneceram uma base de referências para compará-los entre si e gerar conclusões com base científica sobre qual a melhor forma de se executar um pavimento flexível.

Os valores das massas específicas aparentes secas de cada corpo de prova e os valores correspondentes das umidades de moldagem permitiram o traçado da curva de compactação do solo. A ordenada máxima da curva forneceu a massa específica aparente seca máxima e a abscissa que lhe corresponde é a umidade ótima do solo.

Os critérios considerados pela norma do DNIT para brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento foi medido em metros cúbicos de sub-base ou base compactada na pista, fazendo-se distinção em relação aos teores aplicados e a energia de compactação empregada.

3.1.7 Análise dos custos

Após dimensionados os pavimento, analisamos os custos para cada camada equivalente de ambas as estruturas. Os dados foram aferidos com base na composição e comparação de custos unitários do DER – PR de outubro de 2016, sem a desoneração.

Os itens analisados no referencial de preços e serviços rodoviários do DER – PR tanto da brita graduada simples quanto da brita graduada tratada com cimento para os diferentes valores de N passagens de um eixo padrão de 8,2 toneladas foram descritos no capítulo 4 de resultados e discussões, juntamente com suas respectivas unidades utilizadas e preços unitários de cada item descrito. As quantidades de cada item foram obtidas de acordo com o dimensionamento realizado, obtendo assim, a somatória dos custos de ambos os pavimentos através do produto da quantidade de cada item descrito pelo seu respectivo preço unitário, desconsiderando terraplenagem, pois esta deve ser idêntica para ambos os pavimentos dimensionados e os custos para 1 m² de pavimento.

4 CAPÍTULO

4.1 RESULTADOS E DISCUÇÕES

4.1.1. Dosagens

Através da dosagem podemos observar que a granulometria dos agregados estão de maneira adequada para todos os tamanhos de partículas, desde o tamanho máximo até o mínimo com uma acertada deficiência de finos, sobretudo de material que passa na peneira número 200. É a forma adequada e preferencial de se trabalhar em pavimentação, pois evita a segregação no decorrer do processo construtivo.

A brita graduada é obtida da britagem de rochas basálticas, gnáissicas ou calcárias, dependendo da geologia local (CARNIN *et al.*, 2004). A mistura em usina de produtos de rocha são que, nas medidas adequadas, resultaram no enquadramento da terceira faixa granulométrica de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: composição granulométrica da brita graduada.

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso.		
ABNT	Abertura, mm	Faixa I	Faixa II	Faixa III
2"	50,8	100	-	-
1 ½"	38,1	90-100	100	100
1"	25,4	-	-	77-100
¾"	19,1	50-85	60-95	66-88
⅜"	9,5	35-65	40-75	46-71
n.º 4	4,8	25-45	25-60	30-56
n.º 10	2,0	18-35	15-45	20-44
n.º 40	0,42	8-22	8-25	8-25
n.º 200	0,074	3-9	2-10	5

Fonte: (DER/PR ESP-P, 2005).

Os projetos de mistura de agregados são muito utilizados na execução de bases e sub-bases estabilizadas granulométricamente, em misturas betuminosas ou quaisquer outras misturas que envolvam dois ou mais materiais de granulometrias diferentes como a brita graduada tratada com cimento que é um dos materiais cimentados mais utilizados para a pavimentação, para a BGTC o teor resultante foi de 4% de cimento Portland tipo CP II-E.

As dosagens realizada tem sua importância na análise do dimensionamento de um pavimento pois afeta muitas propriedades importantes na mistura de agregados, incluindo

rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga, resistência por atrito e resistência ao dano por umidade.

Na Tabela 3 e Tabela 4 foram apresentados os dados referente ao ensaio da dosagem da brita graduada simples.

Tabela 3: Dosagem brita graduada simples

PENEIRAS		7/8		3/4		3/8		11/2	
		FRAÇÃO	10%	FRAÇÃO	0%	FRAÇÃO	25%	FRAÇÃO	20%
ASTM	mm	Gran.	Fração	Gran.	Fração	Gran.	Fração	Gran.	Fração
2"	50,800	100,0	10,0	100,0	0,0	100,0	25,0	100,0	20,0
1 1/2"	38,100	100,0	10,0	100,0	0,0	100,0	25,0	100,0	20,0
1"	25,400	88,1	8,8	100,0	0,0	100,0	25,0	84,0	16,8
3/4	19,100	12,00	1,2	99,2	0,0	100,0	25,0	33,0	6,6
3/8	9,520	4,5	0,5	0,1	0,0	60,0	15,0	0,2	0,0
4	4,800	0,2	0,0	0,1	0,0	9,7	2,4	0,2	0,0
30	0,600	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
200	0,074	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0

Fonte: O autor (2017)

Tabela 3 (continuação): Dosagem brita graduada simples

3/16		cimento		Projeto	Especificação		Faixa de trabalho	
FRAÇÃO	45%	FRAÇÃO	0%		mín.	máx.	mín.	máx.
Gran.	Fração	Gran.	Fração					
100,0	45,0	100,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
100,0	45,0	100,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
100,0	45,0	100,0	0,0	95,6	77,0	100,0	88,6	100,0
100,0	45,0	100,0	0,0	77,8	66,0	88,0	72,8	82,8
100,0	45,0	100,0	0,0	60,5	46,0	71,0	55,5	65,5
88,0	39,6	98,2	0,0	42,1	30,0	56,0	37,1	47,8
28,0	12,6	93,6	0,0	12,7	8,0	20,0	9,7	15,7
12,0	5,4	89,0	0,0	5,5	5,0	10,0	5,0	7,5

Fonte: O autor (2017)

Tabela 4: Dosagem brita graduada simples

PENEIRAS		Projeto				
ASTM	mm					
2"	50,800	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,400	95,6	77,0	100,0	88,6	100,0
3/4	19,100	77,8	66,0	88,0	72,8	82,8
3/8	9,520	60,5	46,0	71,0	55,5	65,5
4	4,800	42,1	30,0	56,0	37,1	47,8
30	0,600	12,7	8,0	20,0	9,7	15,7
200	0,074	5,5	5,0	10,0	5,0	7,5

Fonte: O autor (2017)

E na Tabela 5 e Tabela 6 foram apresentados os dados referente ao ensaio da dosagem da brita graduada tratada com cimento.

Tabela 5: Dosagem brita graduada tratada com cimento

PENEIRAS		7/8		3/4		3/8		11/2	
		FRAÇÃO	10%	FRAÇÃO	0%	FRAÇÃO	25%	FRAÇÃO	20%
ASTM	mm	Gran.	Fração	Gran.	Fração	Gran.	Fração	Gran.	Fração
2"	50,800	100,0	10,0	100,0	0,0	100,0	25,0	100,0	20,0
1 1/2"	38,100	100,0	10,0	100,0	0,0	100,0	25,0	100,0	20,0
1"	25,400	88,1	8,8	100,0	0,0	100,0	25,0	84,0	16,8
3/4	19,100	12,00	1,2	99,2	0,0	100,0	25,0	33,0	6,6
3/8	9,520	4,5	0,5	0,1	0,0	60,0	15,0	0,2	0,0
4	4,800	0,2	0,0	0,1	0,0	9,7	2,4	0,2	0,0
30	0,600	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
200	0,074	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0

Fonte: O autor (2017)

Tabela 5 (continuação): Dosagem brita tratada com cimento

3/16		cimento		Projeto	Especificação		Faixa de trabalho	
FRAÇÃO	41%	FRAÇÃO	4%		mín.	máx.	mín.	máx.
Gran.	Fração	Gran.	Fração					
100,0	41,0	100,0	4,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
100,0	41,0	100,0	4,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
100,0	41,0	100,0	4,0	95,6	77,0	100,0	88,6	100,0
100,0	41,0	100,0	4,0	77,8	66,0	88,0	72,8	82,8
100,0	41,0	100,0	4,0	60,5	46,0	71,0	55,5	65,5
88,0	36,1	98,2	3,9	42,5	30,0	56,0	37,5	47,8
28,0	11,5	93,6	3,7	15,3	8,0	20,0	9,7	15,7
12,0	4,9	89,0	3,6	8,5	5,0	10,0	5,0	7,5

Fonte: O autor (2017)

Tabela 6: Dosagem brita tratada com cimento

PENEIRAS		Projeto				
ASTM	mm					
2"	50,800	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1"	25,400	95,6	77,0	100,0	88,6	100,0
3/4	19,100	77,8	66,0	88,0	72,8	82,8
3/8	9,520	60,5	46,0	71,0	55,5	65,5
4	4,800	42,5	30,0	56,0	37,5	47,8
30	0,600	15,3	8,0	20,0	9,7	15,7
200	0,074	8,5	5,0	10,0	5,0	7,5

Fonte: O autor (2017)

4.1.2 CBR

O método de dimensionamento com base no ensaio de CBR, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) acrescido do conceito de coeficiente estrutural da AASHO, foi a base principal do método do antigo DNER, atual DNIT, mas que teve modificações importantes feitas pelo Eng. Murillo (COUTINHO, 2011).

O método de ensaio CBR levou em conta a necessidade de um dimensionamento que analisasse e considerasse as características que influenciam o desempenho estrutural do pavimento. O ensaio CBR supre as dificuldades encontradas nos ensaios de campo e submete o material a condições de carregamento (COUTINHO, 2011).

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia, também conhecido como ensaio de CBR, consistiu na determinação da relação percentual entre a pressão necessária para se penetrar um pistão padronizado, em uma amostra de solo devidamente preparada e a pressão para que o mesmo pistão penetre a mesma profundidade, em uma amostra padrão de pedra britada (BRASIL, 1994).

De acordo com PREUSSLER (2001), um pavimento bem dimensionado, em função do CBR, garante que não se atingirão tensões que possam provocar ruptura por cisalhamento e deformações permanentes excessivas.

Segundo especificações do (DNIT, 2006), Os materiais de subleito devem apresentar $\text{CBR} \geq 2\%$, os materiais para sub-base devem apresentar $\text{C.B.R.} \geq 20\%$ e os materiais para base devem apresentar $\text{CBR} \geq 80\%$. Para efeito de dimensionamento, o valor de CBR para a camada de sub-base foi limitado em 20%, valor máximo considerado no ábaco de dimensionamento.

O CBR utilizado para o camada de base granular para a realização dos cálculos do pavimento flexível com a utilização da BGS e para BGTC foi de 80% para ambas as estruturas pavimentadas.

4.1.3 – Dimensionamentos pelo método do DNER

Os dimensionamentos do pavimento flexível da BGS e BGTC foram realizados conforme o método Empírico do DNER 1979/81, onde foi calculado as espessuras das camadas do reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, tendo como base o número N, número de repetições de um eixo de carga padrão de 8,2 toneladas. O CBR utilizado foi de 80%, tanto para BGS como para BGTC obtendo assim a espessura total de ambos os pavimentos flexíveis.

O valor adotado de 5, 7.5 e 12.5 centímetros para a espessura do revestimento do pavimento flexível da BGS e BGTC foi com base no Manual de Pavimentação do DNIT que relaciona número de repetições de um eixo de carga padrão, como utilizamos para o nosso dimensionamento $N = 5 \times 10^6$, $N = 5 \times 10^7$ e $N = 5 \times 10^8$ a espessura do revestimento betuminoso teve 5, 7.5 e 12.5 centímetros de espessura de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7: Espessura mínima de revestimento betuminoso

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT 2006).

Dimensionamento para $N = 5 \times 10^6$

Através dos cálculos obtemos o valor de 22,69 centímetros para a espessura da camada de base (B), segundo o método do DNER, a espessura mínima para cada camada de base granulares é de 10 centímetros e a espessura mínima total é de 15 centímetros. Desta forma, adotamos a espessura de 23 centímetros para a base (B) que ficou dentro da norma.

A Tabela 8 obtém as dimensões das camadas, CBR e coeficientes utilizados tanto para BGS como para BGTC:

Tabela 8: Dimensionamento para $N=5 \times 10^6$

Tabela 6: Dimensionamento para P-3110				
revestimento	$K_R = 2$	27,24 cm $H_{20} = 32,68 \text{ cm } (^2)$	$H_{Ref} = 36,13 \text{ cm}$	$H_T = 36,13 \text{ cm}$
base	$K_B = 1$ CBR = 80			
sub-base	$K_S = 0,81$ CBR = 20	$(^1)$		
reforço	$K_{Ref} = 1$ CBR = 12,47			
subleito	CBR = 12			

Fonte: O Autor (2017)

O resultado da espessura da camada de sub-base foi de 3,86 centímetros, porém, como foi abordado anteriormente, de acordo com o método do DNER a espessura mínima para cada camada de base granular é de 10 centímetros, logo o valor adotado para a camada de sub base foi de 10 centímetros.

Os valores calculados e adotados para as camadas do pavimento flexível utilizando BGS e BGTC podem ser observados na Tabela 9, como também o valor negativo de -5 centímetros calculado para o reforço do sub leito, o que significou ser desnecessário a construção da camada de reforço.

Tabela 9: Resultado das espessuras das camadas BGS e BGTC para $N=5 \times 10^6$

CAMADAS	CALCULADO	ADOTADO
Revestimento (R)		5 cm
Base (B)	22,69 cm	23 cm
Sub – Base (h_{20})	3,86 cm	10 cm
Reforço (h_{Ref})	-5 cm	0 cm

Fonte: O Autor (2017)

O valor de cálculo da base mais o revestimento adotado resulta na espessura total da base H_{20} , que por recomendações do DNIT, de acordo com as atuais cargas de tráfego no Brasil, foi majorada em 20% para que a estrutura do pavimento tenha um reforço, desta forma a espessura H_{20} resultante foi de 32,68 centímetros.

O valor de cálculo H_{Ref} foi obtido da somatória da espessura total da base H_{20} mais a espessura calculada da sub base, resultando em 36,13 centímetros de espessura. Como os cálculos apresentaram um valor negativo para a espessura da camada de reforço de sub leito, a espessura total de cálculo do dimensionamento H_T resultante do pavimento flexível foi de 36,13 centímetros.

De acordo com o método de dimensionamento de pavimento do DNER adotamos um valor diferente do calculado para a espessura da camada de sub base, resultando na espessura total H_T de 38 centímetros, expresso pela somatória dos valores adotados para as camadas do pavimento flexível.

Dimensionamento para $N = 5 \times 10^7$

Seguindo o mesmo procedimento de cálculo anterior, obtemos o valor de 26,5 centímetros para a espessura da camada de base (B), acima da espessura mínima de 10 centímetros para camada de base granulares adotada pelo DNER. Desta forma, adotamos a espessura de 27 centímetros para a base (B) que ficou dentro da norma.

A Tabela 10 obtém as dimensões das camadas, CBR e coeficientes utilizados tanto para BGS como para BGTC:

Tabela 10: Dimensionamento para $N=5 \times 10^7$

revestimento	$K_R = 2$	30,43 cm	$H_{20} = 36,52 \text{ cm } (^2)$	$H_{Ref} = 40,37 \text{ cm}$	$H_T = 40,37 \text{ cm}$
base	$K_B = 1$ CBR = 80				
sub-base	$K_S = 0,81$ CBR = 20	(')			
reforço	$K_{Ref} = 1$ CBR = 12,47				
subleito	CBR = 12				

Fonte: O Autor (2017)

O cálculo da espessura da camada de sub-base foi de 9,09 centímetros, porém, como foi abordado anteriormente, de acordo com o método do DNER a espessura mínima para cada camada de base granular é de 10 centímetros, logo o valor adotado para a camada de sub base foi de 10 centímetros.

Os valores calculados e adotados para as camadas do pavimento flexível utilizando BGS e BGTC para $N = 5 \times 10^7$ podem ser observados na Tabela 9, como também o valor negativo de -0,7 centímetros calculado para o reforço do sub leito, o que significou, da mesma forma para o cálculo anterior onde utilizamos $N = 5 \times 10^6$, ser desnecessário a construção da camada de reforço.

Tabela 11: Resultado das espessuras das camadas BGS e BGTC para $N=5 \times 10^7$

CAMADAS	CALCULADO	ADOTADO
Revestimento (R)		7,5 cm
Base (B)	26,5 cm	27 cm
Sub – Base (h_{20})	9,09 cm	10 cm
Reforço (h_{Ref})	-0,7 cm	0 cm

Fonte: O Autor (2017)

Também majorada em 20%, a espessura H_{20} resultante foi de 36,52 centímetros. O valor de cálculo H_{Ref} foi obtido da somatória da espessura total da base H_{20} mais a espessura calculada da sub base, resultando em 40,37 centímetros de espessura. Como os cálculos apresentaram um valor negativo para a espessura da camada de reforço de sub leito, a espessura total de cálculo do dimensionamento H_T resultante do pavimento flexível foi de 40,37 centímetros.

De acordo com o método de dimensionamento de pavimento do DNER adotamos um valor H_T de 41 centímetros para a espessura total do pavimento flexível com $N = 5 \times 10^7$.

Dimensionamento para $N = 5 \times 10^8$

Em relação aos cálculos para $N = 5 \times 10^8$ obtemos o valor de 30,8 centímetros para a espessura da camada de base (B), também acima da espessura mínima. Desta forma, adotamos a espessura de 31 centímetros para a base (B) que ficou dentro da norma.

A Tabela 12 obtém as dimensões das camadas, CBR e coeficientes utilizados tanto para BGS como para BGTC:

Tabela 12: Dimensionamento para $N=5 \times 10^8$

revestimento	$K_R = 2$	34,00 cm	$H_{20} = 40,80 \text{ cm } (^2)$	$H_{Ref} = 45,10 \text{ cm}$	$H_T = 45,10 \text{ cm}$
base	$K_B = 1$ CBR = 80				
sub-base	$K_S = 0,81$ CBR = 20	(')			
reforço	$K_{Ref} = 1$ CBR = 12,47				
subleito	CBR = 12				

Fonte: O Autor (2017)

O resultado da espessura da camada de sub-base foi de 14,9 centímetros, bem acima da espessura mínima de 10 centímetros para cada camada de base granular, logo o valor adotado para a camada de sub base foi de 15 centímetros.

Os valores calculados e adotados para as camadas do pavimento flexível utilizando BGS e BGTC podem ser observados na Tabela 13. Diferente dos dois resultados anteriores, o valor calculado para o reforço do sub leito foi 4 centímetros positivos, o que significou ser necessário a construção da camada de reforço adotada em 4 centímetros.

Tabela 13: Resultado das espessuras das camadas BGS e BGTC para $N=5 \times 10^8$

CAMADAS	CALCULADO	ADOTADO
Revestimento (R)		12,5 cm
Base (B)	30,8 cm	31 cm
Sub – Base (h_{20})	14,9 cm	15 cm
Reforço (h_{Ref})	4 cm	4 cm

Fonte: O Autor (2017)

Seguindo o mesmo procedimento anterior a espessura total da base H_{20} também foi majorada em 20% para que a estrutura do pavimento tenha um reforço, desta forma a espessura H_{20} resultante foi de 40,80 centímetros. O valor de cálculo H_{Ref} foi obtido da somatória da espessura total da base H_{20} mais a espessura calculada da sub base, resultando em 45,10 centímetros de espessura.

4.1.4 – Análise de custos

A análise comparativa de custo entre o pavimento flexível construído com brita graduada simples e o construído com brita graduada tratada com cimento para $N = 5 \times 10^6$, $N = 5 \times 10^7$ e $N = 5 \times 10^8$ foi expressa através das seguintes Tabelas:

Tabela 14: Descrição de Custos para BGS e $N=5 \times 10^6$

BRITA GRADUADA SIMPLES					
ITEM	DESCRICAO	UNIDADE	QUANTIDADE	PR. UNIT.	TOTAL (m2)
500000	Escarificação, regularização compac. subleito	m2	1	R\$ 2,99	R\$ 2,99
532000	Macadame hidráulico	m3	0,1	R\$ 99,55	R\$ 9,96
531100	Brita graduada 100% PM	m3	0,23	R\$ 115,50	R\$ 26,57
560100	Imprimação impermeab. exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,32	R\$ 0,32
561100	Pintura de ligação exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,22	R\$ 0,22
570130	C.B.U.Q - na usina, excl. fornec. CAP	t	0,1	R\$ 108,77	R\$ 10,88
					R\$ 50,94

Fonte: Referencial de Preços de serviços (DER-PR 2016)

Tabela 15: Descrição de Custos para BGS e $N=5 \times 10^7$

BRITA GRADUADA SIMPLES					
ITEM	DESCRICAO	UNIDADE	QUANTIDADE	PR. UNIT.	TOTAL (m2)
500000	Escarificação, regularização compac. subleito	m2	1	R\$ 2,99	R\$ 2,99
532000	Macadame hidráulico	m3	0,1	R\$ 99,55	R\$ 9,96
531100	Brita graduada 100% PM	m3	0,27	R\$ 115,50	R\$ 31,19
560100	Imprimação impermeab. exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,32	R\$ 0,32
561100	Pintura de ligação exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,22	R\$ 0,22
570130	C.B.U.Q - na usina, excl. fornec. CAP	t	0,1	R\$ 108,77	R\$ 10,88
					R\$ 55,56

Fonte: Referencial de Preços de serviços (DER-PR 2016)

Tabela 16: Descrição de Custos para BGS e $N=5 \times 10^8$

BRITA GRADUADA SIMPLES					
ITEM	DESCRICAO	UNIDADE	QUANTIDADE	PR. UNIT.	TOTAL (m2)
500000	Escarificação, regularização compac. subleito	m2	1	R\$ 2,99	R\$ 2,99
532000	Macadame hidráulico	m3	0,1	R\$ 99,55	R\$ 9,96
531100	Brita graduada 100% PM	m3	0,31	R\$ 115,50	R\$ 35,81
560100	Imprimação impermeab. exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,32	R\$ 0,32
561100	Pintura de ligação exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,22	R\$ 0,22
570130	C.B.U.Q - na usina, excl. fornec. CAP	t	0,1	R\$ 108,77	R\$ 10,88
					R\$ 60,18

Fonte: Referencial de Preços de serviços (DER-PR 2016)

Tabela 17: Descrição de Custos para BGTC e $N=5 \times 10^6$

BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO					
ITEM	DESCRICAO	UNIDADE	QUANTIDADE	PR. UNIT.	TOTAL (m2)
500000	Escarificação, regularização compac. subleito	m2	1	R\$ 2,99	R\$ 2,99
532000	Macadame hidráulico	m3	0,1	R\$ 99,55	R\$ 9,96
531130	Brita graduada tratada c/cimento ($C_p=4\%$) 100% PM	m3	0,23	R\$ 166,53	R\$ 38,30
560100	Imprimação impermeab. exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,32	R\$ 0,32
561100	Pintura de ligação exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,22	R\$ 0,22
570130	C.B.U.Q - na usina, excl. fornec. CAP	t	0,1	R\$ 108,77	R\$ 10,88
					R\$ 62,67

Fonte: Referencial de Preços de serviços (DER-PR 2016)

Tabela 18: Descrição de Custos para BGTC e $N=5 \times 10^7$

BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO					
ITEM	DESCRICAO	UNIDADE	QUANTIDADE	PR. UNIT.	TOTAL (m2)
500000	Escarificação, regularização compac. subleito	m2	1	R\$ 2,99	R\$ 2,99
532000	Macadame hidráulico	m3	0,1	R\$ 99,55	R\$ 9,96
531130	Brita graduada tratada c/cimento ($C_p=4\%$) 100% PM	m3	0,27	R\$ 166,53	R\$ 44,96
560100	Imprimação impermeab. exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,32	R\$ 0,32
561100	Pintura de ligação exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,22	R\$ 0,22
570130	C.B.U.Q - na usina, excl. fornec. CAP	t	0,1	R\$ 108,77	R\$ 10,88
					R\$ 69,33

Fonte: Referencial de Preços de serviços (DER-PR 2016)

Tabela 19: Descrição de Custos para BGTC e $N=5 \times 10^8$

BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO					
ITEM	DESCRICAO	UNIDADE	QUANTIDADE	PR. UNIT.	TOTAL (m2)
500000	Escarificação, regularização compac. subleito	m2	1	R\$ 2,99	R\$ 2,99
532000	Macadame hidráulico	m3	0,1	R\$ 99,55	R\$ 9,96
531130	Brita graduada tratada c/cimento ($C_p=4\%$) 100% PM	m3	0,31	R\$ 166,53	R\$ 51,62
560100	Imprimação impermeab. exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,32	R\$ 0,32
561100	Pintura de ligação exclusive fornec. da emulsão	m2	1	R\$ 0,22	R\$ 0,22
570130	C.B.U.Q - na usina, excl. fornec. CAP	t	0,1	R\$ 108,77	R\$ 10,88
					R\$ 75,99

Fonte: Referencial de Preços de serviços (DER-PR 2016)

Os dados foram verificados com base na composição e comparação de custos unitários do DER – PR de outubro de 2016, sem a desoneração. Resultando em R\$50,94; R\$55,56 e R\$60,18 por m^2 para a construção de um pavimento flexível com brita graduada simples e R\$62,67; R\$69,33 e R\$75,99 por m^2 para a construção de um pavimento flexível com brita graduada tratada com cimento para os respectivos valores de $N = 5 \times 10^6$, $N = 5 \times 10^7$ e $N = 5 \times 10^8$. Importante ressaltar as variações constantes nos custos dos materiais de pavimentação dependendo do tempo e o local onde são adquiridos.

5 CAPITULO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se que as espessuras das camadas e por consequência a espessura total dos pavimentos dimensionados com brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento foram idênticas, isso demonstra uma expressiva limitação do método de dimensionamento pois este desconsidera o ganho de propriedades mecânicas das bases ao se adicionar cimento, é possível que outros métodos de dimensionamento possam resultar em diferentes espessuras, não sobrepujando esta melhora no material.

A limitação do Método Empírico do DNIT deriva-se da utilização do CBR e do número N para o dimensionamento, onde ao aplicar na formulação proposta CBRs superiores a 20% as espessuras equivalentes das camadas tendem a ser muito próximas.

Pelo método de dimensionamento Empírico do DNIT a espessura do revestimento será sempre em função do número N, número de passagens de um eixo padrão, independentemente se o tipo de material empregado nas camadas de subleito e base forem BGS ou BGTC, visto que o valor é função apenas do tráfego, quanto maior o número N, maior fica a espessura das camadas necessárias para proteger o sub-leito das ações deste tráfego.

Observamos que o acréscimo na espessura do revestimento no método empírico é sempre o mesmo, independentemente do tipo de material empregado nas camadas, visto que o valor é função apenas do tráfego, e que a sensibilidade do método à variação do tráfego independe das propriedades mecânicas do pavimento; e COUTINHO (2011) diz que o método empírico do DNIT é muito restringido pelos critérios de seleção de materiais e de espessuras.

Por mais que uma estrutura de pavimento flexível realizada com brita graduada tratada com cimento tenha um custo mais elevado a sua estrutura pode apresentar maior resistência as deformações provocadas pelo trafego refletindo em economia para reformas e manutenções.

Assim, verifica-se que o custo para execução dos pavimentos utilizando BGTC são cerca de 6% maiores do que com a utilização de BGS, sendo que a ordem de melhoria das propriedades mecânicas da BGTC, podem superar de forma muito mais expressiva este custo agregado ao levar em consideração a vida útil total do pavimento.

6 CAPITULO

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Análise comparativa para diferentes tipos de dimensionamentos de uma estrutura de pavimento flexível.

Análise comparativa da resistência mecânica de um pavimento flexível com brita graduada simples e brita graduada tratada com cimento.

Análise comparativa de um pavimento flexível, pavimento rígido e pavimento semi-rígido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentos. Rio de Janeiro, 1982.

BALBO, J. T. **Estudos das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semirrígidos**. 1993.181 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Departamento de Engenharia de Transporte. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.

DNIT (2006). **Manual de pavimentação**. Publicação IPR - 179. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias.

DNIT (2009). NORMA DNIT. **Pavimentação – Sub-base ou base de brita graduada Simples - Especificação de serviço**. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias.

DNIT (2015). NORMA DNIT. **Pavimentação – Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento - Especificação de serviço**. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MALYSZ, R. **Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação**. 2004. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARQUES, G. L. O. E MORAIS, W. M. “**Estudos de Deformações Permanentes em Pré-Misturados a Frio Através de Ensaios Estáticos**”. Relatório final de pesquisa FAPEMIG PROC. TEC 1415/97, 1999.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. 2005, **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª edição, 570 p. Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ.

PINTO, S., PREUSSLER, E. S., 1980, **Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens – Instituto Pesquisas Rodoviárias DNER - IPR, Rio de Janeiro.