



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
ENGENHARIA CIVIL

DANIELLE ROSA BATISTA LIMA

**VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE GEOGRELHA APLICADA NA
PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
DELMIRO GOUVEIA - ALAGOAS**

DELMIRO GOUVEIA

2017

DANIELLE ROSA BATISTA LIMA

**VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE GEOGRELHA APLICADA NA
PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
DELMIRO GOUVEIA - ALAGOAS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, Campus do Sertão, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof^a Dra. Rafaela Faciola Coelho de Souza Ferreira

DELMIRO GOUVEIA

2017

L732v Lima, Danielle Rosa Batista

Viabilidade econômica do uso de geogrelha aplicada na
pavimentação rodoviária: estudo de caso no município de
Delmiro Gouveia – Alagoas / Danielle Rosa Batista lima – 2017.
78f.: il.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de
Alagoas, Delmiro Gouveia, 2017.

Orientação: Prof. Dra. Rafaela Faciola Coelho de Souza.

1. Geogrelha. 2. Pavimentação rodoviária.

I. Título. II. Delmiro Gouveia

CDU 528.271.1 (813.5)

Folha de Aprovação

AUTOR: DANIELLE ROSA BATISTA LIMA

VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE GEOGRELHA APLICADA NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE DELMIRO GOUVEIA – ALAGOAS

Monografia apresentada à Banca Examinadora
do curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Alagoas, Campus do Sertão e
aprovado em 06 de 12 de 2017.

Rafaela Faciola Coelho de Souza Ferreira

Profª Dra. Rafaela Faciola Coelho de Souza Ferreira, UFAL (Orientadora)

Banca Examinadora:

Rafaela Faciola Coelho de Souza Ferreira

Profª Dra. Rafaela Faciola Coelho de Souza Ferreira, UFAL (Orientadora)

Alverlando Ricardo

Prof. Msc. Alverlando Silva Ricardo, UFAL (Examinador Interno)

Karlisson André Nunes da Silva

Prof. Msc. Karlisson André Nunes da Silva, UFAL (Examinador Interno)

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Rafaela Faciola, dedicada e gentil na tarefa de orientação, por todo apoio, tempo e cuidado dispensados em prol da conclusão deste trabalho;

Aos professores do curso de Engenharia Civil do Campus do Sertão pelos conhecimentos compartilhados e por todo o esforço em promover uma educação superior de qualidade;

À Universidade Federal de Alagoas, pela oportunidade de ingressar no curso de Engenharia Civil;

Ao Programa Ciências Sem Fronteiras do Governo Federal, pela oportunidade de participar de intercâmbio acadêmico em outro país, e aos professores do Illinois Institute of Technology por todo o aprendizado;

Aos meus pais, Daniel e Jadelma, por todo suporte, incentivo, e amor em todos os momentos;

Aos meus avós, José Vieira, Ireni e Roza, pelas orações constantes, pela alegria demonstrada sempre ao me ver e por compreenderem a minha ausência durante o período de curso;

Aos meus tios e tias, em especial à Paula e à Margarida, pelas orações e pelos ensinamentos preciosos para minha formação pessoal;

À minha irmã, Regina, por ser meu exemplo de dedicação, esforço e persistência;

Ao meu primo, Geovane, pela torcida e por tornar a minha vida mais alegre;

À Leiliane, pela amizade e por sempre me encorajar nas decisões fundamentais ao meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional;

Ao Dimas, pela amizade, apoio e incentivo durante todo o período de curso, por caminhar junto comigo e tornar essa jornada mais leve;

Aos colegas de turma, por todo o aprendizado compartilhado durante o curso;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa tão almejada por mim e pela minha família.

A Deus, por ser minha fortaleza e proteção.

RESUMO

As rodovias são vias de transporte de pessoas ou cargas que podem ser pavimentadas ou não, proporcionando segurança aos usuários. A pavimentação das rodovias deve apresentar capacidade suficiente para suportar a carga e permitir longa durabilidade dos pavimentos. Quando da escassez de materiais naturais com boa capacidade de suporte para serem aplicados em subleitos, utilizam-se técnicas construtivas inovadoras a fim de suprir essa demanda, principalmente na ausência de material natural nas proximidades da construção do pavimento. Sendo assim, torna-se oneroso transportar grandes volumes de terra de outras localidades para compor as camadas de aterro e reforço de subleito. Dentro desse contexto, surgem os geossintéticos aplicados à pavimentação rodoviária, que são materiais industrializados capazes de reduzir a espessura da camada quando aplicados nas camadas de base dos pavimentos. No entanto, apesar de suas propriedades satisfazerem os requisitos para a substituição dos materiais convencionais, deve-se avaliar o fator econômico. Neste trabalho, analisa-se a aplicação de pavimentos reforçados com geossintéticos do tipo geogrelhas nas camadas de base, comparados com pavimentos convencionais. Verifica-se, ainda, a viabilidade do uso da geogrelha considerando a situação real de um estudo de caso na pavimentação rodoviária no Município de Delmiro Gouveia - AL, para cinco períodos de projeto diferentes. O dimensionamento do pavimento convencional foi realizado a partir do método proposto pela AASHTO (1993) e, para o dimensionamento do pavimento reforçado com geogrelha na camada de base, utilizou-se o método modificado da AASHTO. Os valores utilizados para o cálculo do orçamento são da base de dados de valores para o estado de Alagoas, e seguem as exigências características do projeto em estudo. Assim, foram feitas comparações entre o custo dos pavimentos convencionais e pavimentos reforçados com geogrelha na camada de base para cada período de projeto estudado. Foi possível observar que o uso de geossintético pode tornar a obra mais econômica, a depender das condições particulares do projeto. Portanto, não se descarta a possibilidade de utilizar o geossintético nesses casos, desde que a vantagem econômica seja levada em consideração, como por exemplo a longa distância até as jazidas com disponibilidade de materiais naturais com capacidade de suporte suficientes para o projeto, o que acarreta em maiores custos de execução da rodovia.

Palavras-chave: Pavimentação; Geossintético; Geogrelha; Reforço de base; Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Roadways are routes that allow the transport of passengers and goods. It can be paved or not, providing safety and comfort to the users. The roadway paving must provide enough capacity to support the load and allow a long durability of the pavement. When there is a lack of materials to provide the required capacity to the pavement structure, innovative construction techniques are applied in order to fill this lack, especially when it is difficult to find the materials around the construction site. Therefore, the transportation of large volumes of materials to build the pavement layers increases the pavement cost. Under these circumstances, geogrids are applied in the base course of the pavement to reduce its thickness. However, although the geogrids satisfy the technical requisites to replace the conventional materials, it is necessary to analyze the economic viability of its use. The present study analyzes the application of geogrids in base course comparing it to the conventional pavement. Furthermore, an economic analysis of the geogrid application in a project in Delmiro Gouveia - Alagoas was conducted for five different life cycles. The conventional pavement was designed based on AASHTO (1993), while the reinforced pavement was designed based on the modified AASHTO method. The values used to estimate the costs are from the official database of values for the state of Alagoas – Brazil. The estimating cost for the different life cycles and pavement structures shows that the application of geogrid can reduce the pavement cost depending on the life cycle for this particular project. Thereby, the use of geogrid in the pavement structure is an alternative that can reduce costs in situations where it is difficult to find proper materials nearby the construction site.

Key-words: Roadway paving; Geosynthetics; Geogrid; Base Reinforcement; Economic Viability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Camadas genéricas de um pavimento.....	17
Figura 2 – Resposta mecânica de pavimento flexível: tensões concentradas.	18
Figura 3 – Resposta mecânica de pavimento rígido: tensões distribuídas.	19
Figura 4 – Classificação de Revestimentos Flexíveis..	20
Figura 5 – Classificação de Bases e Sub-bases Flexíveis..	21
Figura 6 - Geogrelha. Fonte: Inovageo (s. d.).	28
Figura 7 – Aplicação de geogrelha como reforço de camada de base.....	29
Figura 8 - Aplicação de base granular sobre geogrelha bidirecional na construção da Rodovia IQUITOS.....	30
Figura 9 - Equipamento utilizado por Kakuda; Parreira e Fabbri (2011) para realizar os ensaios de pavimento reforçado com geogrelha..	31
Figura 10 - Equipamento utilizado por Antunes (2008) para a execução do estudo.....	32
Figura 11 – Eixos rodoviários de caminhões e ônibus.....	34
Figura 12 - Esquema da prensa utilizada em ensaios de CBR.	36
Figura 13 - Mapa de situação do projeto.....	42
Figura 14 - Representação das camadas do pavimento.....	58
Figura 15- (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base.....	58
Figura 16 - (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base.....	60
Figura 17 - (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base.....	62
Figura 18 - (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base.....	65
Figura 19 - (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base.....	67
Figura 20 - Custo Total dos Serviços de Pavimentação apresentados no Projeto Básico.....	69
Figura 21 - Correção do custo de pavimentação apresentado no Projeto Básico para o ano de 2016.....	70
Figura 22 - (a) Espessura das camadas do pavimento pelo método do DNIT; (b) Espessura das camadas do pavimento pelo método da AASHTO (1993); (c) Espessura das camadas do pavimento pelo método da modificado da AASHTO (1993).....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Carga máxima permissível vigente no Brasil.....	34
Tabela 2 – Espessuras mínimas das camadas de revestimento e bases granulares.	39
Tabela 3 – Volume médio diário de tráfego (primeira hipótese).	44
Tabela 4 –Número N (primeira hipótese).....	45
Tabela 5 – Volume médio diário de tráfego (segunda hipótese).....	45
Tabela 6 – Volume médio diário de tráfego (segunda hipótese).....	46
Tabela 7 – Número N (segunda hipótese).	46
Tabela 8 – Volume médio diário de tráfego (terceira hipótese).	46
Tabela 9 – Volume médio diário de tráfego (terceira hipótese).	47
Tabela 10 –Número N (terceira hipótese).	47
Tabela 11 – Volume médio diário de tráfego (quarta hipótese).	47
Tabela 12 – Volume médio diário de tráfego (quarta hipótese).	48
Tabela 13 – Número N (quarta hipótese).	48
Tabela 14 – Volume médio diário de tráfego (quinta hipótese).	49
Tabela 15 – Número N (quinta hipótese).	49
Tabela 16 – Volume médio diário de tráfego (sexta hipótese).....	50
Tabela 17 –Número N (sexta hipótese).	50
Tabela 18 – Média Aritmética dos Números N encontrados através das hipóteses de crescimento de tráfego.....	51
Tabela 19 – Coeficiente estrutural das camadas do pavimento.....	52
Tabela 20 – Resumo do dimensionamento para os diferentes períodos de projeto.....	56
Tabela 21 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 10 anos.	59
Tabela 22 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 10 anos.	59
Tabela 23 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 10 anos.	60
Tabela 24 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 20 anos.	61
Tabela 25 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 20 anos.	61
Tabela 26 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 20 anos.	62
Tabela 27 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 30 anos.	63
Tabela 28 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 30 anos.	63
Tabela 29 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 30 anos.	64
Tabela 30 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 40 anos.	65
Tabela 31 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 40 anos.	66
Tabela 32 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 50 anos.	67
Tabela 33 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 50 anos.	68

Tabela 34 - Orçamento do pavimento dimensionado pelo método da AASHTO (1993) para o período de projeto de 10 anos.	71
Tabela 35 - Orçamento do pavimento com a utilização de geogrelha dimensionado pelo método modificado da AASHTO (1993) para o período de projeto de 10 anos.	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 SURGIMENTO DO CONCEITO DE PAVIMENTAÇÃO	14
2.2 AS CAMADAS DOS PAVIMENTOS	15
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS	17
2.4 MATERIAIS CONVENCIONAIS UTILIZADOS EM PAVIMENTAÇÃO.....	19
2.5 GEOSSINTÉTICOS: FUNÇÕES, TIPOS E CLASSIFICAÇÃO.....	21
2.6 GEOGRELHA APLICADA NA CAMADA DE BASE	27
2.7 CASOS DE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICO COM REFORÇO DE PAVIMENTO .	29
2.8 BENEFÍCIOS E RESTRIÇÕES DO USO DE GEOSSINTÉTICOS EM CAMADAS DE BASE.....	32
2.9 CONSIDERAÇÃO DO TRÁFEGO MISTO RODOVIÁRIO EM PROJETOS DE PAVIMENTOS	33
2.10 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - CBR.....	35
3. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	36
3.1 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PELO MÉTODO DA AASHTO (1993).....	36
3.2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL COM USO DE GEOSSINTÉTICO – AASHTO (1993) MODIFICADO	39
3.3 PROJEÇÃO GEOMÉTRICA DO TRÁFEGO – DNIT (2006).....	40
3.4 CÁLCULO DO NÚMERO “N”	40
4. ESTUDO DE CASO	42
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	42
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	43
4.2.1 PROJEÇÃO DO TRÁFEGO E CÁLCULO DO NÚMERO N	43
4.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PARA A LIGAÇÃO ENTRE BR- 423 E AL-220.....	51
4.3.1 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO PARA VIDA ÚTIL DE 10 ANOS	51
4.3.2 RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS PARA OS DIFERENTES PERÍODOS DE PROJETO ADOTADOS	55
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
5.1 PERÍODO DE PROJETO DE 10 ANOS	58
5.2 PERÍODO DE PROJETO DE 20 ANOS	60
5.3 PERÍODO DE PROJETO DE 30 ANOS	62
5.4 PERÍODO DE PROJETO DE 40 ANOS	64
5.5 PERÍODO DE PROJETO DE 50 ANOS	66

5.6 COMPARATIVO ENTRE O ORÇAMENTO APRESENTADO NO PROJETO BÁSICO	68
6. CONCLUSÃO	74
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
8. REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

O setor de transporte possui fundamental importância para o desenvolvimento das cidades. A devida importância é evidenciada através da possibilidade de acesso e mobilidade de pessoas e mercadorias, viabilizando o progresso dos mais diversos setores que compõem a economia de um país.

Nesse aspecto, a matriz de transporte no Brasil é composta por cinco modais: rodoviário, ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo. O modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil, tendo uma participação de 61,1% na matriz de transporte, segundo a Confederação Nacional de Transportes - CNT (2017). Assim, rodovias em más condições de circulação causam gastos elevados ao país, principalmente devido ao aumento do consumo de combustíveis, tempo de viagem, manutenção da frota de veículos e ocorrência de acidentes.

Dessa maneira, nota-se a necessidade de construção e conservação de estradas, que proporcionem conforto no deslocamento dos veículos, segurança e resistência adequada para suportar as solicitações do tráfego. Para atingir tais finalidades, são empregadas camadas de materiais que apresentem bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo da vida útil da estrutura composta por camadas finitas de materiais chamada de pavimento.

Balbo (2007) afirma que, na maioria das obras de pavimentação rodoviária, busca-se utilizar materiais que podem ser encontrados próximos aos locais das obras, a fim de reduzir os custos de execução. No entanto, quando da escassez de materiais naturais, técnicas construtivas inovadoras são empregadas a fim de suprir essa demanda. Além disso, o transporte de grandes volumes de materiais torna a obra onerosa, podendo inviabilizar sua construção.

Nesse aspecto, materiais geossintéticos são uma alternativa capaz de substituir parte dos materiais convencionais utilizados em pavimentação e, ainda, reduzir os custos operacionais e tempo de execução. Além disso, a utilização de geossintéticos reduz a exploração de jazidas, protegendo o meio ambiente.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo identificar a viabilidade econômica da utilização de um material geossintético, a geogrelha, aplicada na camada de base de um pavimento, com o intuito de reduzir as espessuras das camadas do

pavimento. Assim, realizou-se um estudo de caso comparativo entre pavimentos convencionais e pavimentos com o uso de geogrelha na camada de base para diferentes períodos de vida útil de um projeto de pavimentação no Município de Delmiro Gouveia – Alagoas, através do dimensionamento desses pavimentos e da elaboração de seus respectivos orçamentos.

Para tanto, o trabalho está estruturado de forma a estabelecer uma linha de raciocínio sobre o tema. Assim, após essa breve introdução, são apresentados conceitos, informações e exemplos práticos importantes ao entendimento do tema, através de uma revisão bibliográfica. Logo após, são mostrados os métodos de projeção de tráfego e de dimensionamento utilizados. Na seguinte seção, é feita a caracterização do projeto que compõe o estudo de caso, assim como o resultado do dimensionamento para os diferentes períodos de projeto. Após, elaboraram-se os orçamentos dos respectivos pavimentos seguidos de uma análise comparativa entre os mesmos. Por fim, as informações foram sintetizadas na seção de conclusão desse trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SURGIMENTO DO CONCEITO DE PAVIMENTAÇÃO

Na busca por alimentação e água, o homem primitivo criou caminhos para facilitar a passagem entre sua caverna e campos de caça e fontes de água. Dessa maneira, ao melhorar o caminho por onde havia a necessidade de se deslocar frequentemente, o homem primitivo estava atendendo o princípio fundamental do transporte (SENÇO, 2007).

A utilização de animais a fim de conseguir um maior rendimento nas viagens levou o homem a adquirir melhorias nos caminhos. Além disso, com a invenção da roda, foi permitida a utilização de um rústico veículo atrelado a esses animais. Nesse sentido, houve a necessidade de melhorar ainda mais esses caminhos. Assim, como o transporte se tornava cada vez mais necessário à sobrevivência dos povos e sua utilização se tornava cada vez mais frequente, alguns problemas foram identificados. Um deles refere-se à necessidade de alterar a natureza para melhorar as condições de passagem, seja cortando, aterrando ou construindo obras que permitam a passagem sobre cursos d'água (ibid.).

Além disso, as estradas precisavam oferecer boas condições de passagem em qualquer época do ano. Para resolver esse problema, revestiam-se os leitos carroçáveis, adicionando-lhes estabilidade. Nos terrenos arenosos, que ofereciam boas condições nos períodos chuvosos e excessiva poeira nos períodos secos, e nos terrenos argilosos, que ofereciam boas condições nos períodos secos e lama nos períodos chuvosos, tentava-se agregar estabilidade misturando areia e argila, em determinadas proporções que evitassem o aparecimento de poeira excessiva nas secas e lama nas chuvas (ibid.).

Nesse contexto, a busca por melhorias para os leitos carroçáveis, através da utilização de melhores materiais, encaminhou à utilização de revestimentos de pedras, misturas betuminosas ou concreto de cimento, o que é conhecido, atualmente, como pavimentação (ibid.).

Assim, a pavimentação tem como objetivo garantir condições de deslocamento confortáveis e seguras, através de estruturas e materiais capazes de resistir aos esforços decorrentes da ação do tráfego atrelados às condições climáticas. Além disso, visa-se a minimização dos custos, buscando o aproveitamento de materiais locais para as obras a fim de reduzir os custos operacionais e de manutenção durante a vida útil da

infraestrutura (BALBO, 2007). Nesse aspecto, as rodovias desempenham papel fundamental no desenvolvimento de qualquer país.

2.2 AS CAMADAS DOS PAVIMENTOS

Para garantir segurança e conforto no transporte de pessoas e cargas, as rodovias devem possuir estrutura que atenda a esses requisitos. Nesse sentido, dá-se o nome de pavimento à estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito. Essa camada tem como função garantir segurança e conforto no rolamento e resistir às ações do tráfego atreladas às condições climáticas de maneira durável e ao mínimo custo possível (BERNUCCI et al, 2008).

O pavimento é concebido com o intuito de receber e distribuir os esforços gerados pela ação do tráfego a fim de aliviar pressões sobre as camadas mais inferiores. Geralmente, as camadas inferiores são menos resistentes. As cargas são transmitidas à fundação, denominada de subleito, de forma aliviada, evitando a ocorrência de deformações que impossibilitem ou dificultem a sua utilização ou até de rupturas da fundação.

Ainda nesse contexto, como as cargas são aplicadas por veículos e pelo ambiente de modo transitório, são, assim, caracterizadas como cargas cíclicas ou repetitivas, de magnitude não constante. Essas cargas geram esforços solicitantes horizontais e verticais. Os esforços horizontais podem solicitar alguns materiais à tração ou apenas confinar outros materiais. Já os esforços verticais, são resumidos a esforços de compressão e cisalhamento (SENÇO, 2007).

Dessa maneira, Balbo (2007) comenta que cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas com o objetivo de propiciar adequadas condições de rolamento em qualquer condição climática. Assim, as camadas do pavimento são denominadas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento.

Subleito

O subleito é o terreno de fundação do pavimento. A camada mais próxima à superfície é considerada o subleito, uma vez que, as pressões são reduzidas à medida que se aprofundam no maciço, de maneira a serem consideradas desprezíveis. Senço (2007) considera que a camada com 1,0 a 1,5 metro como sendo a fundação ou subleito. O subleito é constituído de material natural consolidado e compactado em áreas de corte

do corpo estradal ou de material transportado e compactado em casos de aterro (BALBO, 2007).

A conformação do subleito, transversal e longitudinalmente, é chamada de regularização. A regularização proporciona as características geométricas do pavimento acabado, ou seja, a inclinação transversal. Inclinação de 2% deve ser aplicada nos trechos em tangente, de 3 a 4% em regiões de alto volume de chuvas e rampa com inclinação de superelevação em curvas.

Reforço do subleito

O reforço de subleito é composto por uma camada de solo de melhor qualidade que a camada subjacente para receber menor magnitude de pressões. Essa camada possui espessura constante com características tecnológicas inferiores às da camada superior, a sub-base (BALBO, 2007).

O emprego da camada de reforço do subleito não é obrigatório, uma vez que as camadas superiores, a depender de suas espessuras, podem aliviar as pressões sobre um subleito com características inferiores. No entanto, a utilização da camada do subleito se dá por fatores econômicos, tendo em vista que as camadas de base e sub-base são mais custosas. Assim, muitas vezes, opta-se pela inserção da camada de reforço do subleito como alternativa mais econômica ao aumento da espessura das camadas de base e sub-base (ibid.).

Base e Sub-base

A sub-base possui a mesma função que a base, ou seja, distribui os esforços para camadas inferiores. Além disso, as bases e sub-bases também podem desempenhar funções na drenagem superficial dos pavimentos, sendo a sub-base a camada complementar à base (BALBO, 2007). É utilizada quando não for recomendado, por fatores técnicos e econômicos, a construção da base diretamente sobre o subleito regularizado ou reforço do subleito. Ainda de acordo com Balbo (2007), os materiais que constituem as bases são: mistura de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concreto, solo estabilizado naturalmente, entre outros. Os mesmos materiais podem ser empregados na sub-base.

Revestimento

Revestimento, também chamado de capa ou capa de rolamento, é a camada tanto quanto impermeável, que recebe a carga das ações do tráfego. Essa camada é destinada a receber as cargas sem sofrer grandes deformações e distribuir para as demais camadas, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e resistir ao desgaste (SENÇO, 2007).

Os materiais que podem atender às condições necessárias para o revestimento são: paralelepípedos, pedras cortadas e justapostas, blocos de concreto pré-moldados, placas de concreto, concreto compactado com rolo, tratamentos superficiais betuminosos e misturas asfálticas em geral (ibid.)

A Figura 1 representa um corte na seção de um pavimento e ilustra a posição de cada camada que compõe a estrutura do pavimento.

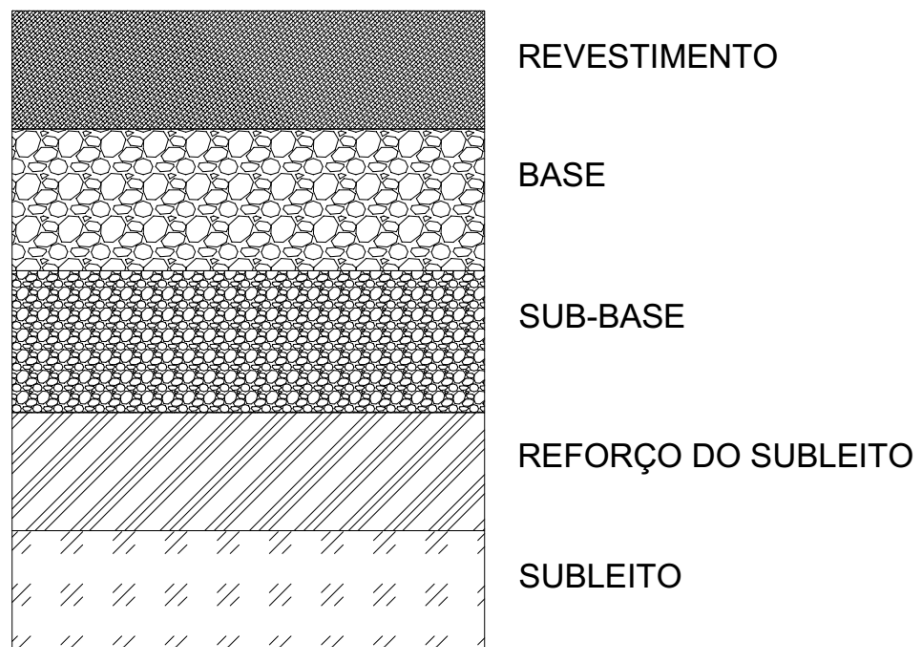


Figura 1– Camadas genéricas de um pavimento. Fonte: O autor (2017).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2006), os pavimentos são classificados como flexíveis, semi-rígidos e rígidos.

Pavimento flexível é aquele em que todas as camadas se deformam elasticamente sob o carregamento aplicado, e, assim, a carga se distribui aproximadamente uniforme entre as camadas. De acordo com Senço (2007), os pavimentos flexíveis são dimensionados a compressão e a tração na flexão. Quando uma carga atua sobre um pavimento flexível, o campo de tensões gerado na estrutura é muito concentrado nas proximidades do ponto de aplicação (Figura 2) dessa carga (BALBO, 2007).

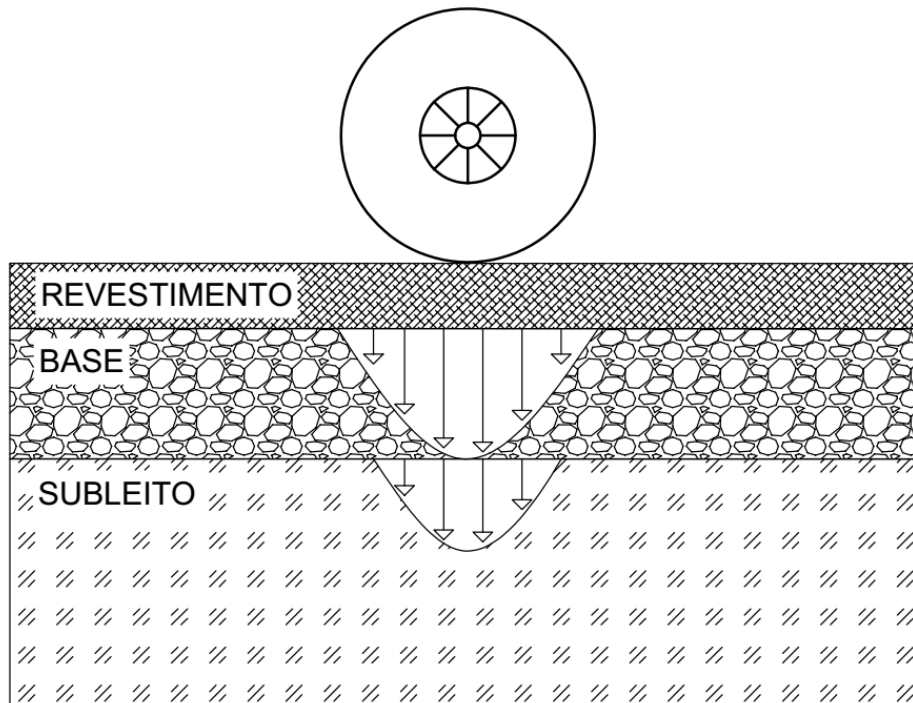


Figura 2 – Resposta mecânica de pavimento flexível: tensões concentradas. Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

O pavimento semi-rígido é aquele constituído por revestimento asfáltico com camadas de base de material estabilizado com adição de cimento, por exemplo, uma camada de solo-cimento revestida por uma camada asfáltica (DNIT, 2006).

O pavimento rígido é aquele em que o revestimento é altamente rígido em relação às camadas inferiores, ou seja, é pouco deformável. O revestimento rígido absorve, praticamente, todas as tensões aplicadas devido à ação do tráfego. Conforme Senço (2007), o pavimento rígido rompe por tração na flexão. Além disso, como Balbo (2007) enfatiza, o campo de tensões gerado pela aplicação de uma carga num pavimento rígido

é bem mais disperso do que o campo de tensões verificado nos pavimentos flexíveis (Figura 3). Assim, os efeitos da carga são distribuídos, quase que uniformemente, em toda a dimensão da placa, reduzindo as magnitudes dos esforços verticais sobre o subleito.

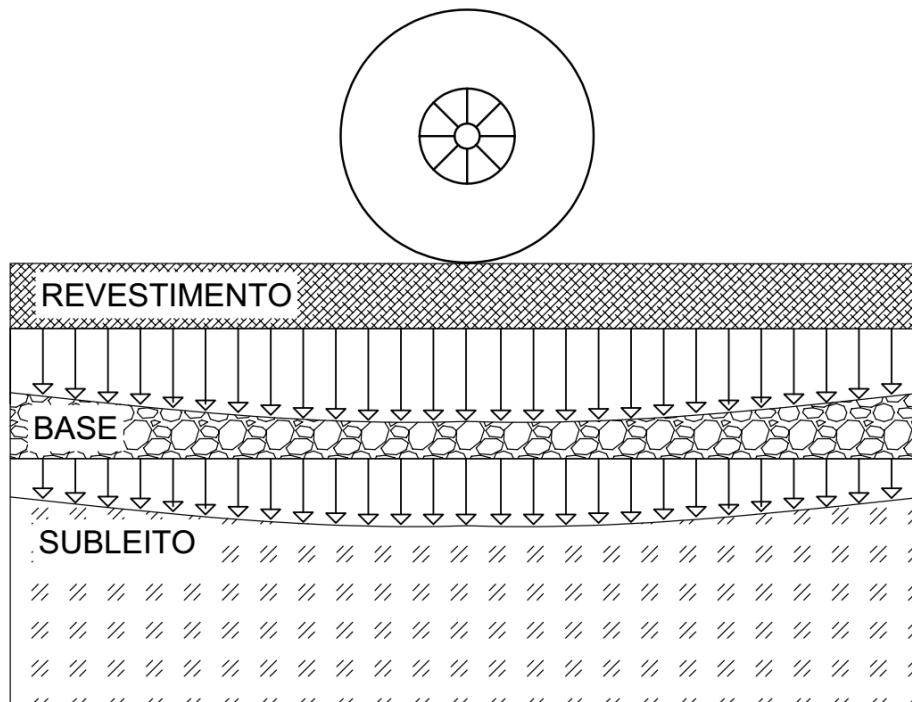


Figura 3 – Resposta mecânica de pavimento rígido: tensões distribuídas. Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

2.4 MATERIAIS CONVENCIONAIS UTILIZADOS EM PAVIMENTAÇÃO

Os materiais convencionais utilizados em pavimentação rodoviária são responsáveis por classificar o pavimento, ou seja, por determinar se o pavimento é flexível, semi-rígido ou rígido. Nesse aspecto, os materiais utilizados na camada de revestimento de um pavimento flexível são os revestimentos betuminosos ou calçamento, que são caracterizados de acordo com os materiais e métodos de execução (DNIT, 2006). Os métodos e os respectivos materiais utilizados estão representados na Figura 4.

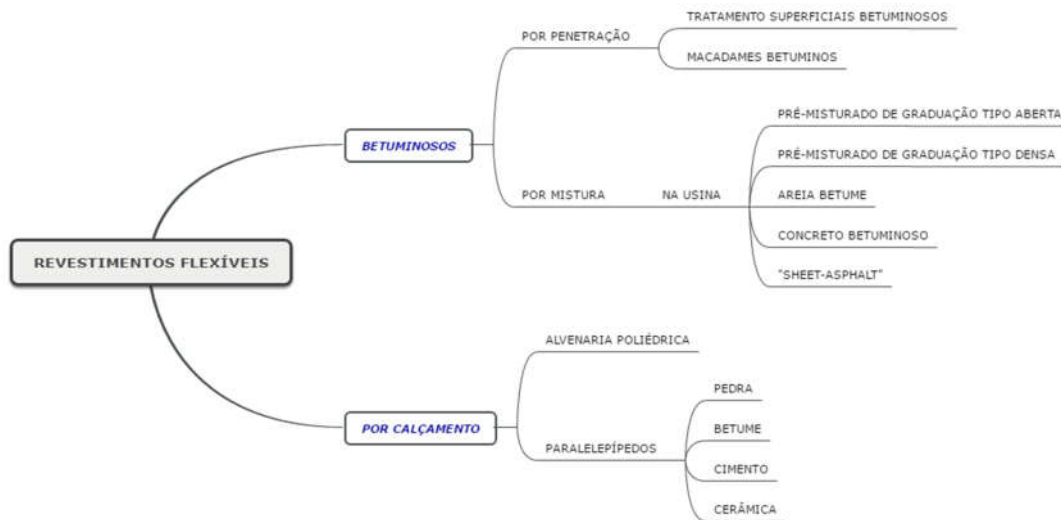


Figura 4 – Classificação de Revestimentos Flexíveis. Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

As bases e sub-bases flexíveis são divididas em dois grupos: granulares e estabilizadas com aditivos (Figura 5). A camada é granular e estabilizada granulometricamente quando é constituída por solos, britas de rocha ou de escória de alto forno, ou pela mistura desses materiais. Essa camada pode ser formada, ainda, por macadame hidráulico ou seco, que consiste na utilização de britas de graduação aberta compactadas e que tem seus vazios preenchidos por materiais finos de britagem ou solo de granulometria e plasticidade adequados. A camada estabilizada com aditivos utiliza os mesmos processos tecnológicos e construtivos da camada granular estabilizada granulometricamente, porém faz uso dos aditivos cimento, cal e betume para atender a requisitos de densidade, durabilidade e resistência (DNIT, 2006).

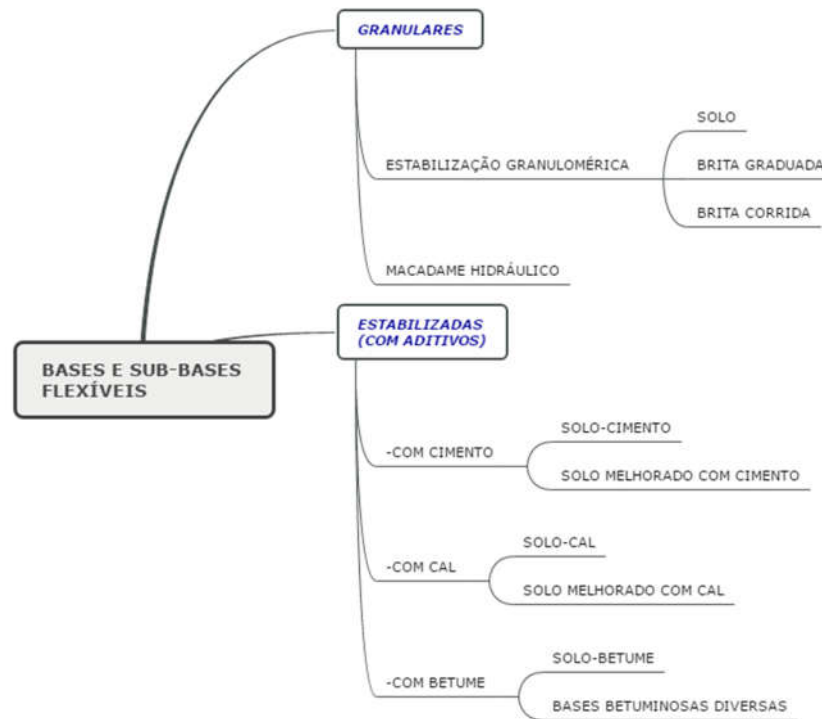


Figura 5 – Classificação de Bases e Sub-bases Flexíveis. Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

Além dos materiais convencionais apresentados, novos materiais surgem na indústria da construção civil a fim de suprir a demanda de materiais naturais que possam atender as características requeridas. O surgimento de novos materiais pode ser uma alternativa econômica, além de reduzir os impactos ambientais gerados pela exploração de jazidas, por exemplo. Nesse aspecto, no âmbito da pavimentação, geossintéticos são utilizados com diversas funções nas camadas do pavimento, melhorando as condições do mesmo, podendo reduzir custos, tempo de execução das obras e impactos ambientais negativos.

2.5 GEOSSINTÉTICOS: FUNÇÕES, TIPOS E CLASSIFICAÇÃO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003) define geossintético como sendo um produto polimérico, que pode ser sintético ou natural, industrializado, fabricado para a aplicação em obras de caráter geotécnico, tendo como principais funções:

- Controle da erosão superficial – Prevenção de erosão superficial de partículas de solo ocasionadas pelo escoamento superficial de um fluido;

- Drenagem – Coleta e condução de um fluido através do corpo de um geossintético;
- Filtração – Retenção de partículas de solo ou outras partículas, liberando a passagem do fluido em movimento;
- Impermeabilização – Barreira ou desvio de fluidos;
- Proteção – Limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas;
- Reforço – Melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica através da utilização das propriedades mecânicas de um geossintético;
- Separação – Evita a mistura ou interação de materiais adjacentes.

Dentro desse contexto, de acordo com Vermatti (2004), novos geossintéticos são desenvolvidos a cada dia, de modo que, muitos ainda não foram devidamente definidos e classificados. O quadro 1 apresenta a classificação, sigla e definição dos geossintéticos, segundo a ABNT (2003 APUD Vermatti, 2004).

Quadro 1- Classificação dos geossintéticos.

(continua)

Classificação	Sigla	Definição
Geobarra	GBA	Material definido na forma de barra cuja função predominante de reforço.
Geocélula	GL [GCE]	Material definido com estrutura tridimensional aberta, constituída de células interligadas, cuja função e é confinar mecanicamente os materiais nela inseridos. Apresentam com função predominante de reforço e controle de erosão.
Geocomposto	GC	Produto industrializado formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar uma função específica.

Fonte: ABNT (2003) APUD Vermatti, (2004).

Quadro 1- Classificação dos geossintéticos.

(continuação)

Classificação	Sigla	Definição
Geocomposto argiloso para barreira impermeabilizante	GCL	Estrutura formada pela associação de geossintéticos a um material argiloso de baixa condutividade, desenvolvida para a função de barreira impermeabilizante.
Geocomposto para drenagem	GCD	Produto desenvolvido para drenagem, composto geralmente de um geotêxtil que atua como elemento de filtro e de uma georrede ou um geoespaçador que atua como elemento drenante.
Geocomposto para reforço	GCR	Estrutura formada pela associação de geossintéticos não-similares, desenvolvida para reforço.
Geoespaçador	GSP	Produto com estrutura tridimensional constituída de forma a apresentar grande volume de vazios, utilizado predominantemente como meio drenante. Exemplo: geoespaçador em cúspides nas duas faces (ou de pata dupla) na cor preta, e de cúspides em uma face (ou de pata simples) na cor amarela, utilizados como meio drenante.

Fonte: ABNT (2003) APUD Vermatti, (2004).

Quadro 1- Classificação dos geossintéticos.

(continuação)

Classificação	Sigla	Definição
Geoexpandido		Produto fabricado a partir de um polímero expandido formando uma estrutura tridimensional leve, com finalidade principal de aliviar o peso de uma estrutura geotécnica. Exemplo: blocos de geoexpandido fabricados com EPS (poliestireno expandido) aplicados em substituição a aterros convencionais.
Geofôrma		Estrutura realizada a partir de geossintéticos com a finalidade de conter materiais de modo permanente ou provisório. Exemplo> geofôrmas tipo colchão, preenchidas com argamassa, para revestimento de canais.
Geogrelha	GG [GGR]	Produto com estrutura em forma de grelha com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, e constituído por elementos resistentes à tração. É considerado unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção, e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais).

Fonte: ABNT (2003) APUD Vermatti, (2004).

Quadro 1- Classificação dos geossintéticos.

(continuação)

Classificação	Sigla	Definição
Geomanta	GA [GMA]	Produto com estrutura tridimensional permeável, usado para controle de erosão superficial do solo, também conhecido como “biomanta” quando biodegradável. Exemplo: geomanta utilizada no controle de erosão superficial de taludes.
Geomembrana	GM [GMB]	Produto bidimensional de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por materiais termoplásticos, elastoméricos e asfálticos, utilizado para o controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação. Exemplo: geomembrana polimérica flexível, utilizada em obras de impermeabilização.
Geomembrana Reforçada		Geomembrana com armadura de reforço incorporada ao produto, formando um conjunto monolítico.
Geomembrana Texturizada		Geomembrana com acabamento superficial com função de aumentar as características de atrito te interface.
Georrede	GN [GNT]	Produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de drenagem. Exemplo: georrede de pequena espessura, utilizada como núcleo constituinte de geocomposto drenante.

Fonte: ABNT (2003) APUD Vermatti, (2004).

Quadro 1- Classificação dos geossintéticos.

(continuação)

Classificação	Sigla	Definição
Geotêxtil	GT [GTX]	Produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções numa obra geotécnica.
Geotêxtil não-tecido	GTnw	Produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos.
Geotêxtil não-tecido agulhado		Fibras interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem. Exemplo: geotêxtil não-tecido, agulhado, preto, utilizado com diversas funções em vários tipos de obra de engenharia.
Geotêxtil não-tecido termoligado		Fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento. Exemplo: geotêxtil não-tecido, termoligado, cinza, utilizado com diversas funções em vários tipos de obra de engenharia.
Geotêxtil não-tecido resinado		Fibras interligadas por meio de produtos químicos.

Fonte: ABNT (2003) APUD Vermatti, (2004).

Quadro 1- Classificação dos geossintéticos.

(conclusão)

Classificação	Sigla	Definição
Geotêxtil tecido	GTw	Produto obtido de entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fita), segundo direções preferenciais denominadas “trama” (sentido transversal) e “urdume” (sentido longitudinal). Exemplo: geotêxtil tecido, preto, constituído de filamentos tipo laminetes, utilizado com diversas funções em vários tipos de obra de engenharia.
Geotêxtil Tricotado		Produto obtido do entrelaçamento de fios por tricotamento. Exemplo: esquema de geotêxtil tricotado, utilizado com diversas funções em vários tipos de obra de engenharia.
Geotira		Produto em forma de tira com função predominante de reforço.
Geotubo		Produto de forma tubular com função drenante. Exemplo: Geotubo corrugado, flexível, utilizado como elemento drenante, condutor, em vários tipos de dreno subterrâneo.

Fonte: ABNT (2003) APUD Vermatti, (2004).

2.6 GEOGRELHA APLICADA NA CAMADA DE BASE

Os geossintéticos podem ser uma alternativa técnica e economicamente viável para ampliar o desempenho e durabilidade dos pavimentos (REZENDE, s. d.). Dentro desse

contexto, as geogrelhas são materiais industrializados que podem ser aplicados em diversos tipos de obras, tendo a função predominante de reforço.

As geogrelhas possuem estrutura em forma de grelha, cujas aberturas interagem com o meio em que estão confinadas (Figura 6). São consideradas unidirecionais quando apresentam elevada resistência à tração em apenas uma direção, e bidirecionais quando apresentam elevada resistência à tração nas duas direções ortogonais. Quanto ao processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas (VERTEMATTI, 2001).

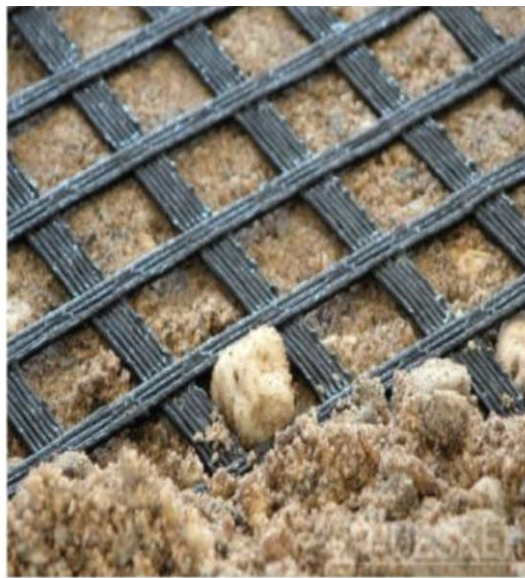


Figura 6 - Geogrelha. Fonte: Inovageo (s. d.).

Segundo Kakuda; Parreira e Fabbri (2011), a aplicação de geogrelha na camada de base como reforço reduz as deformações elásticas e permanentes, sendo o posicionamento da geogrelha na interface com o subleito o que mais contribui para a minimização das deformações. Nesse sentido, Antunes (2008) comenta que o uso da geogrelha retarda a ocorrência de deformações laterais e, conseqüentemente, deformações verticais na superfície do pavimento. Ainda nesse aspecto, Gonçalves (2015) enfatiza que as geogrelhas têm sido desenvolvidas com a incorporação de fibras de elevado módulo de elasticidade, a fim de assegurar maior capacidade de absorção de forças para um valor reduzido de extensão, conferindo capacidade de suporte apropriada à camada em que se

inserir. Nesse contexto, a Figura 7 mostra a aplicação de geogrelha como reforço de base de um pavimento.



Figura 7 – Aplicação de geogrelha como reforço de camada de base. Fonte: Huesker (s. d.).

2.7 CASOS DE APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICO COM REFORÇO DE PAVIMENTO

Os geossintéticos podem ser aplicados em diversos tipos de obras civis, podendo desempenhar mais de uma função em sua aplicação. Como reforço de base, Vertematti (2004) enfatiza que, entre outros benefícios, as geogrelhas reduzem o afundamento em trilha de roda, aumentam a vida ou período de projeto dos pavimentos e reduzem os custos com manutenção.

O uso de geogrelha é uma alternativa que pode trazer, também, benefícios econômicos. Nesse aspecto, tem-se o exemplo da construção da Rodovia Iquitos, no Peru (Figura 8). De acordo com Centurión et al (s. d.), como o projeto estava localizado na Amazônia Peruana, onde não havia vias de acesso para empréstimo de material ou jazidas apropriadas para a exploração. Dessa maneira, o material necessário seria transportado

por mais de 300 km em balsas e, posteriormente, levado ao local da obra através de caminhões transportadores. Assim, o custo com transporte aumentaria em aproximadamente 5 vezes. Nesse contexto, foi utilizada geogrelha bidirecional rígida como reforço de base, com intuito de reduzir a espessura das camadas granulares. Ainda segundo os mesmos autores, houve uma economia de quase R\$ 2.500.000,00, além da constatação de incremento de vida útil ao pavimento, observada através de ensaios utilizando a Viga Benkelman dois anos após a construção.



Figura 8 - Aplicação de base granular sobre geogrelha bidirecional na construção da Rodovia Iquitos. Fonte: Centurión et al (s. d.).

Ferreira (2008) estudou o uso de geossintético como reforço de pavimento em dois trechos da Rodovia Presidente Eurico Gaspar Dutra e constatou ganho imediato no trecho com geossintético de maior resistência. Dentro desse contexto, Cancelli e Montanelli (1999 apud Ferreria, 2008) fizeram testes com o uso de geossintético em vários trechos de diferentes CBR e evidenciaram o benefício do geossintético em trechos de CBR igual a 3%, enquanto que há pouca influência do geossintético em trechos de CBR igual a 8%. Além disso, constataram que quanto maior for a camada compactada, menor é a influência do geossintético.

Os benefícios da geogrelha como reforço de base também foram evidenciados por Kakuda; Parreira e Fabbri (2011) através de ensaios de seções de pavimento e subleito com dimensões próximas às dimensões reais. Os resultados dos ensaios demonstraram

que a utilização da geogrelha reduz deformações elásticas e permanentes. Além disso, foi constatado que o uso da geogrelha é mais eficiente quando posicionada na interface com o subleito do que quando posicionada no centro da camada de base. Os ensaios foram executados em caixa metálica de seção quadrada de 1,5 m de lado e 1,2 m de altura (Figura 9). As cargas cíclicas que simulam o tráfego eram transmitidas através de uma placa circular, onde foi instalada uma borracha em sua parte inferior para melhor se aproximar às condições de campo.



Figura 9 - Equipamento utilizado por Kakuda; Parreira e Fabbri (2011) para realizar os ensaios de pavimento reforçado com geogrelha. Fonte: Kakuda; Parreira e Fabbri (2011).

Em um estudo semelhante, Antunes (2008) utilizou equipamento similar (Figura 10) para ensaiar seções de pavimento convencional e pavimento com uso de geogrelha, identificando certas vantagens do uso do geossintético, tais como: aumento da vida útil, menores tensões totais no interior do pavimento e menores deformações permanentes. No entanto, constatou-se que, nesse estudo, os custos com a utilização de geossintético são mais altos, mas são superados pela vida útil desses pavimentos reforçados.



Figura 10 - Equipamento utilizado por Antunes (2008) para a execução do estudo. Fonte: Antunes (2008).

2.8 BENEFÍCIOS E RESTRIÇÕES DO USO DE GEOSSINTÉTICOS EM CAMADAS DE BASE

Com base em estudos e pesquisas em experiências brasileiras, Vertematti (2004) enfatiza as seguintes vantagens em relação ao uso de geossintéticos em camadas de base:

- O geossintético proporciona um aumento na capacidade de carga, restringe o deslocamento lateral do agregado e evita a contaminação por finos;
- Para a redução de trilhas de roda em pavimentos flexíveis, as geogrelhas são mais recomendadas por serem mais eficientes que geotêxteis;
- Em espessuras de base maiores que 30 cm, o uso de geossintético não apresenta significativa influência. Além disso, a espessura ótima de camada de base para a instalação de geogrelhas varia entre 15 e 25 cm.
- Em pavimentos esbeltos (Número Estrutural entre 2,5 e 3,0 pela AASHTO), o uso de geossintéticos apresenta benefícios, construídos sobre subleitos considerados fracos, ou seja, com CBR menores ou iguais a 3%.
- Geralmente, os benefícios diminuem com o aumento do CBR do subleito, mas estruturas com geogrelhas de maiores módulos secantes apresentam melhores benefícios;
- O uso do geogrelhas aumenta a vida ou período de projeto em 2 vezes.

Além dos benefícios citados anteriormente, a utilização da geogrelha para redução da espessura das camadas do pavimento reduz o tempo de execução e não requer mão de obra especializada. Ainda, segundo Montestruque e Carmo (2015), a utilização de geogrelha diminui os riscos de mau funcionamento da estrutura do pavimento por problemas construtivos, uma vez que é de fácil instalação.

2.9 CONSIDERAÇÃO DO TRÁFEGO MISTO RODOVIÁRIO EM PROJETOS DE PAVIMENTOS

A espessura das camadas que formam a estrutura do pavimento é determinada com base no volume diário médio de veículos, tipo de solo, vida útil do projeto, tipos de veículos que irão circular e custo do investimento (OSCAR e SILVA, 2011).

Para o dimensionamento e análise de pavimentos, os veículos comerciais rodoviários (caminhões e ônibus) são os que efetivamente importam, uma vez que os veículos leves não causam danos significantes às estruturas, se comparados aos veículos comerciais (Balbo, 2007).

Os veículos que compõem o tráfego rodoviário possuem diferentes configurações de eixos, o que causa consideráveis diferenças de magnitude das cargas transmitidas à estrutura do pavimento. Dentro desse contexto, um eixo isolado é denominado simples e eixos em conjunto são denominados tandem. Se o eixo possuir apenas uma roda, essa é considerada simples; se o eixo possuir duas rodas, é chamada de dupla. A representação gráfica e a denominação de cada tipo de eixo são mostradas na Figura 11.





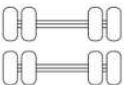

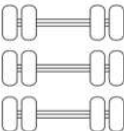

		Eixo Simples de Rodas Simples (ESRS)
		Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD)
		Eixo Tandem Duplo (ETD)
		Eixo Tandem Triplo (ETT)

Figura 11 – Eixos rodoviários de caminhões e ônibus. Fonte: Adaptado de BALBO (2007).

No Brasil, o Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN (1998), através da Resolução 12/98, estabeleceu limites permissíveis de carga de acordo com o tipo de eixo e o tipo de rodagem. A Tabela 1 apresenta esses valores.

Tabela 1- Carga máxima permissível vigente no Brasil.

EIXO	RODAGEM	CARGA MÁXIMA LEGAL (KN)
Simples de Rodas Simples	Simples	60
Simples de Rodas Simples	Dupla	100
Simples de Rodas Duplas	Simples	120
Simples de Rodas Duplas	Dupla	150
Eixo Tandem Duplo	Dupla	170
Eixo Tandem Triplo	Dupla	255

Fonte: Adaptado de CONTRAN (1998).

Os excessos de carga em rodovias que não possuem fiscalização são bastante prejudiciais à estrutura do pavimento. Para a garantia da vida útil do pavimento e do desempenho esperado, é necessário que haja um controle das cargas nas rodovias. Nesse aspecto, Balbo (2007) salienta que a ausência de fiscalização em muitas rodovias brasileiras acarreta em grande quantidade de veículos transportando cargas em excesso, fato observado em uma contagem em balança móvel realizada na BR-101 no estado de Santa Catarina, onde foram constatados excessos de mais de 100%.

Em termos de dimensionamento da estrutura do pavimento, verifica-se a necessidade de converter as solicitações de tráfego expressas em eixos e cargas em um número equivalente de repetições de eixo-padrão. O eixo-padrão equivale a 80 kN. Denominado de N, o número de solicitações de eixo padrão é computado através do conhecimento do tipo de tráfego que utilizará a rodovia. Essa conversão é realizada através do fator de veículo (FV), ou seja, um fator que converte o tráfego real em um tráfego equivalente de solicitações de eixo-padrão (SENÇO, 2007)

Para o cálculo do número N, é necessário levar em consideração o crescimento anual da movimentação de veículos comerciais na rodovia durante o período de projeto. Dessa maneira, a previsão do tráfego é feita através de projeções utilizando hipóteses de crescimento do tráfego na região baseadas em índices de crescimento socioeconômico das regiões servidas pela via e o crescimento do tráfego induzido pela própria implantação da rodovia, além de outras demandas que podem surgir na região (BALBO, 2007).

2.10 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - CBR

O dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo método da AASHTO (1993) utiliza o parâmetro chamado de CBR (California Bearing Ratio) ou ISC (índice de Suporte Califórnia), que é uma das características mais usadas na avaliação do comportamento do solo de fundação do pavimento e dos componentes das camadas do pavimento.

Senço (2007) define CBR como a relação percentual entre a pressão necessária para que ocorra a penetração de um pistão numa amostra de solo e a pressão necessária para que ocorra a penetração do mesmo pistão, a mesma profundidade, numa amostra padrão de pedra britada ou outro material que exija uma pressão de 1.000 psi para uma penetração

de 0,1” ou 1.500 psi para uma penetração de 0,2”. O material padrão possui CBR fixado igual a 100%, enquanto os demais materiais serão relacionados a esse material padrão, em termos de porcentagem, através dos resultados da penetração do pistão na amostra. A Figura 12 apresenta a prensa utilizada na realização do ensaio de CBR.

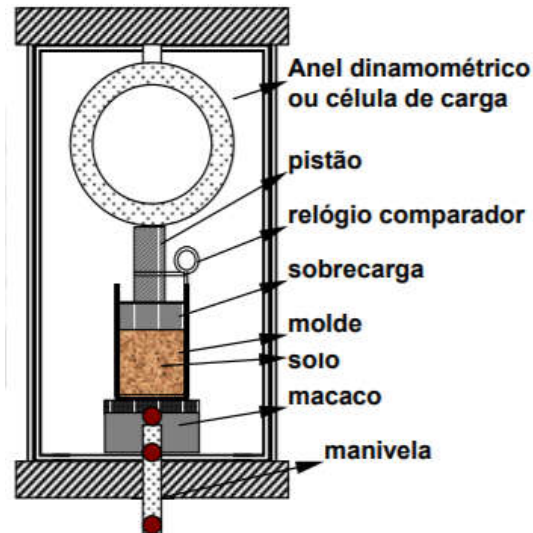


Figura 12 - Esquema da prensa utilizada em ensaios de CBR. Fonte: Fortes (s. d.)

3. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

São apresentados os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados no estudo de caso, além do método de projeção de tráfego e cálculo do número N.

3.1 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PELO MÉTODO DA AASHTO (1993)

O dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo método da AASHTO (1993) se dá através da equação 1. Para a resolução da equação 1, entra-se com as variáveis conhecidas e determina-se o valor do número estrutural (SN) que a torne nula.

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN + 1)^{5,19}}} - \log N + 2,32 \cdot \log(M_R) + Z_R \cdot S_o - 8,27 = 0 \quad (1)$$

Onde:

ΔPSI = perda de serventia esperada para o período de projeto (geralmente, entre 1,7 e 2,2);

N = número de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 82 KN;

M_R = módulo de resiliência do subleito (psi);

Z_R = desvio padrão para a probabilidade de êxito que se quer para a estrutura dimensionada (valores entre -0,84 e -,134 para probabilidade de êxito de 80 a 91%, respectivamente);

S_O = desvio padrão que leva em conta as incertezas das variáveis medidas e do processo construtivo (tipicamente entre 0,44 e 0,49);

SN = número estrutural que representa a capacidade que o pavimento dimensionado deverá ter para atender ao tráfego estimado para o período de projeto.

O número estrutural (SN) é dado por:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (2)$$

Onde:

a_i = coeficiente estrutural do material da camada i ;

D_i = espessura da camada i (polegadas);

m_i = coeficiente de drenagem do material da camada i (fornecido pela AASHTO, 1993).

Os coeficientes estruturais são estimados pelos modelos:

- a_1 (coeficiente estrutural do revestimento de concreto asfáltico) é dado pela equação 3:

$$a_1 = \frac{E_{ca}}{1,43 \cdot E_{ca} + 27.200} \quad (3)$$

- a_2 (coeficiente estrutural da camada de base) é dado pela equação 4:

$$a_2 = 0,249 \log E_b - 0,977 \quad (4)$$

- a_3 (coeficiente estrutural da camada de sub-base) é dado pela equação 5:

$$a_3 = 0,227 \log E_{sb} - 0,839 \quad (5)$$

Onde:

E_{ca} = módulo de elasticidade do concreto asfáltico, em kgf/cm²;

E_b = módulo de elasticidade da camada de base, em psi;

E_{sb} = módulo de elasticidade da camada de sub-base, em psi;

Para determinar a espessura das camadas, é necessário seguir os seguintes passos:

- 1) Determinação dos números estruturais do subleito (SN_3), da sub-base (SN_2) e da base (SN_1) através da equação 1.
- 2) Determinação da espessura do revestimento (D_1) através da equação 6.

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad (6)$$

- 3) Determinação da espessura da base (D_2) através da equação 7.

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 \cdot m_2} \quad (7)$$

- 4) Determinação da espessura da sub-base (D_3) através da equação 8.

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 \cdot m_3} \quad (8)$$

Além disso, as espessuras de revestimento e base devem atender ao requisito de espessura mínima de acordo com o tráfego recomendado pela AASHTO (1993), como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Espessuras mínimas das camadas de revestimento e bases granulares.

Número de Repetições do Eixo-Padrão de 80 KN (N)	Revestimento em Concreto Asfáltico (mm)	Bases Granulares (mm)
$\leq 5 \cdot 10^4$	25	100
$5 \cdot 10^4 < N \leq 1,5 \cdot 10^5$	50	100
$1,5 \cdot 10^5 < N \leq 5 \cdot 10^5$	65	100
$5 \cdot 10^5 < N \leq 2 \cdot 10^6$	75	150
$2 \cdot 10^6 < N \leq 7 \cdot 10^6$	90	150
$N > 7 \cdot 10^6$	100	150

Fonte: Adaptado de AASHTO (1993).

3.2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL COM USO DE GEOSSINTÉTICO – AASHTO (1993) MODIFICADO

O Principal parâmetro ou indicador de melhoria no desempenho do pavimento com a utilização de geossintético é a taxa de benefício de tráfego – TBR (*Traffic benefit ratio*), expressa pela equação 9:

$$TBR = \frac{N_{geo}}{N} \quad (9)$$

Onde:

N_{geo} = número de repetições do eixo padrão de 82 KN que produz um determinado afundamento de trilha de roda (T_R) no pavimento reforçado com geossintético;

N = número de repetições do eixo padrão de 82 KN que produz o mesmo afundamento de trilha de roda (T_R) no pavimento sem o reforço do geossintético;

De acordo com Vertematti (2004), geralmente, o valor de T_R adotado varia entre 2,0 e 2,5 cm para indicar falha ou da estrutura do pavimento. Além disso, o valor usual para a TBR é 2, proporcionado por geossintético que apresente módulo secante superior a 600 KN/m.

Através da utilização do geossintético, há um aumento de vida ou período de projeto expresso pela utilização do TBR, de acordo com a equação 10. Para a resolução da equação 10, entra-se com as variáveis conhecidas e determina-se o valor de SN_{BR} que a torne nula.

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN_{BR} + 1) + \frac{\log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN_{BR}+1)^{5,19}}} - \log \frac{N}{TBR} + 2,32 \cdot \log(M_R) + Z_R \cdot S_0 - 8,27 = 0 \quad (10)$$

Onde:

TBR = taxa de benefício de tráfego;

SN_{BR} = número estrutural considerando a utilização da geogrelha.

Os demais passos para a determinação da espessura das camadas são idênticos aos passos apresentados no dimensionamento de pavimentos flexíveis convencionais pelo método da AASHTO apresentado na seção anterior, através das equações 2 a 8.

3.3 PROJEÇÃO GEOMÉTRICA DO TRÁFEGO – DNIT (2006)

A projeção geométrica do tráfego, segundo DNIT (2006), é expressa pela equação 11:

$$V_n = V_0 \cdot r^n \quad (11)$$

Onde:

V_n = volume do tráfego no ano “n”;

V_0 = volume do tráfego no ano base;

r = fator de crescimento anual;

n = número de anos decorridos após o ano base.

3.4 CÁLCULO DO NÚMERO “N”

O cálculo do número equivalente de operações do eixo simples padrão de 8,2 t, durante o período de projeto é calculado, de acordo com DNIT (2006) pela expressão 12:

$$N = 365 \cdot V_m \cdot P \cdot FV \quad (12)$$

Onde:

V_m = Volume diário médio de tráfego no sentido mais solicitado no ano do período de projeto;

P = período de projeto ou vida útil em anos;

FV = Fator de Veículo é um coeficiente que, multiplicado pelo número de veículo que circula, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para a verificação da viabilidade econômica do uso de geogrelha na redução de espessura de camada de base na pavimentação rodoviária do trecho entre a BR-423/Delmiro Gouveia e a AL-220/Delmiro Gouveia, foi realizado um estudo através do Projeto Básico de Engenharia para execução. A Figura 13 apresenta o mapa de situação do projeto em que possibilita observar a abrangência da construção.

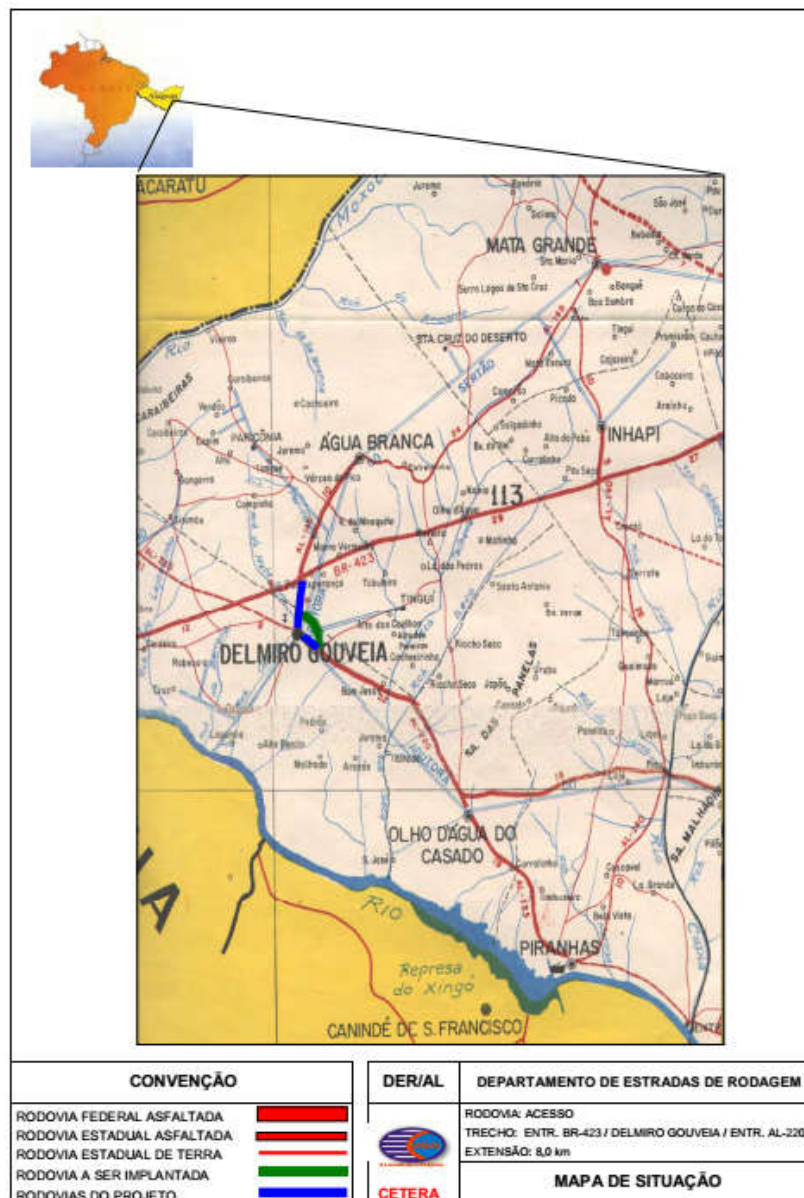


Figura 13 - Mapa de situação do projeto. Fonte: Alagoas (2009).

Como pode ser visto na Figura 13, o projeto abrange uma extensão de 8 km, tendo seu início na interseção com a BR-423, no Povoado Maria Bode, próximo à divisa com o Estado da Bahia, em direção ao município de Delmiro Gouveia. O segmento a ser executado pertence a AL-145, fazendo a ligação entre a BR-423 e a AL-220, passando pelo centro do município de Delmiro Gouveia. Essa ligação entre as vias citadas compõe um sistema viário que liga o Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso, no estado da Bahia, à Hidrelétrica de Xingó no extremo Oeste do Estado (Alagoas, 2009).

Assim, o Projeto contempla o aproveitamento do traçado existente, executando um alargamento para cada lado numa extensão de 2,2 km na rodovia AL-220 e um alargamento para um só lado com extensão de 5,8 km na rodovia estadual AL-145, a partir do entroncamento com a rodovia federal BR-423 no Povoado Maria Bode. Dessa forma, o projeto totaliza uma extensão de 8 km de pista dupla de duas faixas de rolamento, cada uma com 3,5 m de largura (Alagoas, 2009).

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O dimensionamento dos pavimentos para os diferentes períodos de projeto utilizou as mesmas hipóteses de crescimento de tráfego apresentadas no Projeto Básico de Engenharia para a realização da projeção do tráfego, assim como o mesmo método de projeção de tráfego.

Além disso, utilizou-se o valor do CBR do subleito igual a 10% para dimensionar os pavimentos e número N igual a $1 \cdot 10^6$ para 10 anos de período de projeto, valores também apresentados no projeto Básico. Os dados de orçamento foram utilizados nas comparações de custos mostradas na seção de análise de resultados.

4.2.1 PROJEÇÃO DO TRÁFEGO E CÁLCULO DO NÚMERO N

A projeção do tráfego baseou-se nos estudos realizados pelo Governo do Estado de Alagoas para a confecção do Projeto Básico. Nesse aspecto, considerou-se o mesmo volume médio diário de tráfego para o ano 0 do projeto, que corresponde ao ano de 2010, aplicado na fórmula da projeção geométrica de tráfego do DNIT (2006), assim como realizado no Projeto Básico. No entanto, o Projeto Básico contempla as projeções para até 10 anos de vida útil de projeto, enquanto o presente estudo contempla até 50

anos de vida útil. Ainda nesse contexto, optou-se por utilizar as seis hipóteses de crescimento do tráfego e os valores de Fator de Veículos apresentados também no Projeto Básico, sendo a média aritmética desses valores o número N de operações de eixo padrão. Assim, as projeções para cada hipótese estão descritas abaixo:

- Primeira hipótese: considerou-se o tráfego atual com crescimento em progressão geométrica de 3% ao ano.

De acordo com o Projeto Básico (Alagoas, 2009), o volume médio diário de tráfego para o ano base é igual a 152 e o Fator de veículo é igual a 0,757. Assim, a Tabela 3 apresenta o volume médio diário de tráfego para cada ano, enquanto a Tabela 4 o número N para os respectivos períodos de projeto.

Tabela 3 – Volume médio diário de tráfego (primeira hipótese).

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
0	152
1	157
2	161
3	166
4	171
5	176
6	181
7	187
8	192
9	198
10	204
11	210
12	217
13	223
14	230
15	237
16	244
17	251
18	259
19	267
20	275
30	369
40	496
50	666

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

Tabela 4 –Número N (primeira hipótese).

Período de projeto	Volume Médio Diário de Tráfego	Fator de Veículo	N
20	275	0,757	$1,52 \cdot 10^6$
30	369	0,757	$3,1 \cdot 10^6$
40	496	0,757	$5,5 \cdot 10^6$
50	666	0,757	$9,2 \cdot 10^6$

Fonte: O autor (2017).

- Segunda hipótese: considerou-se o tráfego atual com acréscimo de carro de passeio e ônibus em função do início das atividades do Campus Universitário e com crescimento em progressão geométrica de 3% ao ano.

De acordo com o Projeto Básico (Alagoas, 2009), o volume médio diário de tráfego para o ano base é igual a 270 e o Fator de veículo é igual a 0,433. Nesse sentido, o volume médio diário de tráfego para cada ano é apresentado na Tabela 5, enquanto a Tabela 4 apresenta o número N para os respectivos períodos de projeto.

Tabela 5 – Volume médio diário de tráfego (segunda hipótese).
(continua)

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
0	270
1	278
2	286
3	295
4	304
5	313
6	322
7	332
8	342
9	352
10	363
11	374
12	385
13	397
14	408
15	421
16	433
17	446
18	460
19	473

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

Tabela 6 – Volume médio diário de tráfego (segunda hipótese).
(conclusão)

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
20	488
30	655
40	881
50	1184

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

Tabela 7 – Número N (segunda hipótese).

Período de projeto	Volume Médio Diário de Tráfego	Fator de Veículo	N
20	488	0,433	$1,55 \cdot 10^6$
30	655	0,433	$3,1 \cdot 10^6$
40	881	0,433	$5,57 \cdot 10^6$
50	1184	0,433	$9,4 \cdot 10^6$

Fonte: O autor (2017).

- Terceira hipótese: considerou-se o tráfego atual com crescimento em progressão geométrica de 5% ao ano.

Conforme o Projeto Básico (Alagoas, 2009), o volume médio diário de tráfego para o ano base é igual a 152 e o Fator de veículo é igual a 0,757. Nesse aspecto, a Tabela 7 apresenta o volume médio diário de tráfego para cada ano e a Tabela 8 apresenta o número N para os respectivos períodos de projeto.

Tabela 8 – Volume médio diário de tráfego (terceira hipótese).
(continua)

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
0	152
1	160
2	168
3	176
4	185
5	194
6	204
7	214
8	225
9	236
10	248
11	260
12	273

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

Tabela 9 – Volume médio diário de tráfego (terceira hipótese).
(conclusão)

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
13	287
14	301
15	316
16	332
17	348
18	366
19	384
20	403
30	657
40	1070
50	1743

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

Tabela 10 –Número N (terceira hipótese).

Período de projeto	Volume Médio Diário de Tráfego	Fator de Veículo	N
20	403	0,757	$2,2 \cdot 10^6$
30	657	0,757	$5,5 \cdot 10^6$
40	1070	0,757	$1,2 \cdot 10^7$
50	1743	0,757	$2,4 \cdot 10^7$

Fonte: O autor (2017).

- Quarta hipótese: considerou-se o tráfego atual com acréscimo de carro de passeio e ônibus em função do início das atividades do Campus Universitário e com crescimento em progressão geométrica de 5% ao ano.

De acordo com o Projeto Básico (Alagoas, 2009), o volume médio diário de tráfego para o ano base é igual a 270 e o Fator de veículo é igual a 0,433. Assim, a Tabela 9 apresenta o volume médio diário de tráfego para cada ano, enquanto a Tabela 10 o número N para os respectivos períodos de projeto.

Tabela 11 – Volume médio diário de tráfego (quarta hipótese).
(continua)

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
0	270
1	284
2	298
3	313

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

**Tabela 12 – Volume médio diário de tráfego (quarta hipótese).
(conclusão)**

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
4	328
5	345
6	362
7	380
8	399
9	419
10	440
11	462
12	485
13	509
14	535
15	561
16	589
17	619
18	650
19	682
20	716
30	1167
40	1901
50	3096

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

Tabela 13 – Número N (quarta hipótese).

Período de projeto	Volume Médio Diário de Tráfego	Fator de Veículo	N
20	716	0,433	$2,2 \cdot 10^6$
30	1167	0,433	$5,5 \cdot 10^6$
40	1901	0,433	$1,2 \cdot 10^7$
50	3096	0,433	$2,4 \cdot 10^7$

Fonte: O autor (2017).

- Quinta hipótese: considerou-se o tráfego atual mais a parcela do tráfego gerado e desviado (fator de ajustamento socioeconômico $k = 1,5$, para o modelo gravitacional de previsão de tráfego), com crescimento em progressão geométrica de 3% ao ano.

De acordo com o Projeto Básico (Alagoas, 2009), o volume médio diário de tráfego para o ano base é igual a 229 e o Fator de veículo é igual a 0,76. Nesse aspecto, a Tabela 11 apresenta o volume médio diário de tráfego para cada ano e a Tabela 12 apresenta o número N para os respectivos períodos de projeto.

Tabela 14 – Volume médio diário de tráfego (quinta hipótese).

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
0	229
1	236
2	243
3	250
4	258
5	265
6	273
7	282
8	290
9	299
10	308
11	317
12	326
13	336
14	346
15	358
16	367
17	379
18	390
19	402
20	414
30	556
40	747
50	1004

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

Tabela 15 – Número N (quinta hipótese).

Período de projeto	Volume Médio Diário de Tráfego	Fator de Veículo	N
20	414	0,76	$2,3 \cdot 10^6$
30	556	0,76	$4,6 \cdot 10^6$
40	747	0,76	$8,3 \cdot 10^6$
50	1004	0,76	$1,4 \cdot 10^7$

Fonte: O autor (2017).

- Sexta hipótese: considerou-se o tráfego atual mais a parcela do tráfego gerado e desviado (fator de ajustamento socioeconômico $k = 1,5$, para o modelo gravitacional de previsão de tráfego), com crescimento em progressão geométrica de 5% ao ano.

De acordo com o Projeto Básico (Alagoas, 2009), o volume médio diário de tráfego para o ano base é igual a 229 e o Fator de veículo é igual a 0,76. Assim, a Tabela 13

apresenta o volume médio diário de tráfego para cada ano, enquanto a Tabela 14 o número N para os respectivos períodos de projeto.

Tabela 16 – Volume médio diário de tráfego (sexta hipótese).

Ano	Volume Médio Diário De Tráfego
0	229
1	240
2	252
3	265
4	278
5	292
6	307
7	322
8	338
9	355
10	373
11	392
12	411
13	432
14	453
15	476
16	500
17	525
18	551
19	579
20	608
30	990
40	1612
50	2626

Fonte: Alagoas (2009) e Autor (2017).

Tabela 17 –Número N (sexta hipótese).

Período de projeto	Volume Médio Diário de Tráfego	Fator de Veículo	N
20	608	0,76	$3,4 \cdot 10^6$
30	990	0,76	$8,2 \cdot 10^6$
40	1612	0,76	$1,8 \cdot 10^7$
50	2626	0,76	$3,6 \cdot 10^7$

Fonte: O autor (2017).

O valor do número N de operações de eixo padrão será a média aritmética das projeções das seis hipóteses apresentadas acima. Dessa maneira, a Tabela 15 apresenta os valores do número N para os respectivos períodos de projeto

Tabela 18 – Média Aritmética dos Números N encontrados através das hipóteses de crescimento de tráfego.

Período de Projeto	N
20	$2,2 \cdot 10^6$
30	$5,0 \cdot 10^6$
40	$8,2 \cdot 10^6$
50	$2,0 \cdot 10^7$

Fonte: O autor (2017).

4.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL PARA A LIGAÇÃO ENTRE BR-423 E AL-220

4.3.1 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO PARA VIDA ÚTIL DE 10 ANOS

O número N para uma vida útil de 10 anos e o CBR do subleito são os dados iniciais necessários ao dimensionamento do pavimento. São eles:

$$N = 1 \cdot 10^6$$

$$\text{CBR} = 10\%$$

Para o dimensionamento do pavimento convencional e do pavimento com reforço de geogrelha, são apresentados a seguir todas as etapas de cálculo, bem como, as considerações necessárias de projeto:

1- Definição dos Parâmetros de Dimensionamento

- *Nível de confiabilidade (R)*

Foi adotado uma confiabilidade de 90%, o que corresponde a um Z_R de -1,282, de acordo com AASHTO (1993), e um valor de S_O igual a 0,45.

- *Índice de serventia final (P_f)*

A serventia refere-se à capacidade do pavimento de servir ao tráfego. O índice de serventia (PSI) varia de 0 (intrafegável) até 5,0 (em perfeitas condições de rolamento). De acordo com Vertemati (2004), geralmente, um pavimento flexível recém-construído apresenta um PSI inicial P_0 de 4,2 e a serventia final P_f adotada para esse tipo de rodovia é de 2, resultando em um ΔPSI de 2,2.

- *Módulo de resiliência do Subleito (M_R)*

Segundo AASHTO (1993), quando não se realiza ensaio triaxial com cargas cíclicas, o M_R pode ser determinado pela equação 13:

$$M_R(\text{psi}) = 1.500 \cdot \text{CBR}(\%) \quad (13)$$

Assim, o módulo de resiliência do subleito que possui CBR igual a 10% é de:

$$M_R = 1.500 \cdot 10 = 15.000 \text{ psi}$$

- *Coefficientes de Drenagem*

Segundo Vertematti (2004), para as condições brasileiras, pode ser adotado coeficiente de drenagem ao redor de 1,1 para as camadas de base e sub-base granulares. No entanto, tendo em vista que o Brasil possui regiões com variadas condições climáticas, o coeficiente de drenagem será negligenciado ($m=1$), o que tornará as camadas mais espessas. Assim, o risco associado ao uso do coeficiente inadequado é minimizado.

2- Coeficientes Estruturais das Camadas do Pavimento

A Tabela 16 apresenta os valores dos coeficientes estruturais calculados através das equações 3, 4 e 5, de acordo com os materiais a serem empregados no pavimento.

Tabela 19 – Coeficiente estrutural das camadas do pavimento.

Camada	Módulo de elasticidade médio	Coefficiente estrutural
Revestimento	33.000 kgf/cm ²	0,44
Base	42.850 psi	0,17
Sub-base	21.400 psi	0,14

Fonte: O autor (2017).

3- Dimensionamento da Estrutura de Pavimento Convencional

Para o dimensionamento estrutural do pavimento, aplicou-se os valores de N , ΔPSI , Z_R , S_0 e o M_R do subleito na equação 1:

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN + 1)^{5,19}}} - \log N + 2,32 \cdot \log(M_R) + Z_R \cdot S_0 - 8,27 = 0$$

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) + \frac{\log_{10} \left[\frac{2,2}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN + 1)^{5,19}}} - \log 10^6 + 2,32 \cdot \log(15.000) - 1,282 \\ \cdot 0,45 - 8,27 = 0$$

Dessa forma, o valor do número estrutural do subleito SN_3 obtido foi igual a 2,6. Aplicando-se o valor do módulo de resiliência da camada de base igual a 42.850 psi, tem-se:

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) + \frac{\log_{10} \left[\frac{2,2}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN + 1)^{5,19}}} - \log 10^6 + 2,32 \cdot \log(42.850) - 1,282 \\ \cdot 0,45 - 8,27 = 0$$

Assim, o valor do número estrutural da base SN_1 foi de 1,75.

Considerando que será executada uma camada de sub-base de espessura de 10 cm, com material que apresenta módulo de resiliência igual a 21.400 psi, o valor do número estrutural da sub-base SN_2 é determinado pela equação 8:

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 \cdot m_3}$$

$$\frac{10}{2,5} = \frac{2,6 - SN_2}{0,14 \cdot 1}$$

$$SN_2 = 2,04$$

Então, a espessura da camada de revestimento foi determinada pela equação 6, no valor de 10 cm. Esse valor atende ao requisito de espessura mínima da AASHTO (1993).

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1}$$

$$D_1 = \frac{1,75}{0,44} = 3,98'' = 10 \text{ cm}$$

De acordo com a equação 7, a espessura da base deve ser de 5 cm.

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 \cdot m_2}$$

$$D_2 = \frac{2,04 - 1,75}{0,17 \cdot 1} = 1,71'' \cong 5 \text{ cm}$$

No entanto, a espessura mínima para o tráfego considerado deve ser de 15 cm, segundo AASHTO (1993). Assim:

$$D_2 = 15 \text{ cm}$$

O aumento da espessura de base torna possível a diminuição da espessura da camada de sub-base. No entanto, como a espessura adotada para a camada de sub-base já é um valor mínimo em termos construtivos, esse valor será mantido, o que proporciona mais resistência ao pavimento.

4- Dimensionamento da Estrutura de pavimento com Geogrelha

Optou-se por utilizar geogrelha que proporcione um valor de TBR igual a 2. Aplicando-se os valores de TBR, N, ΔPSI , Z_R , S_O e o M_R do subleito na equação 10:

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN_{BR} + 1) + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN_{BR} + 1)^{5,19}}} - \log \frac{W_{18}}{TBR} + 2,32 \cdot \log(M_R) + Z_R \cdot S_O - 8,27 = 0$$

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN_{BR} + 1) + \frac{\log_{10} \left[\frac{2,2}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN_{BR} + 1)^{5,19}}} - \log \frac{10^6}{2} + 2,32 \cdot \log(15.000) + Z_R \cdot S_O - 8,27 = 0$$

O valor de um número estrutural SN_3 obtido foi igual a 2,33. Aplicando-se o valor do módulo de resiliência da camada de base igual a 42.850 psi, tem-se:

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN_{BR} + 1) + \frac{\log_{10} \left[\frac{2,2}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN_{BR} + 1)^{5,19}}} - \log \frac{10^6}{2} + 2,32 \cdot \log(42850) + Z_R \cdot S_O - 8,27 = 0$$

Dessa maneira, o valor do número estrutural da base SN_1 é igual a 1,55.

Considerando que será executada uma camada de sub-base de espessura de 10 cm, com material que apresente módulo de resiliência igual a 21.400 psi, o valor do número estrutural da sub-base SN_2 é determinado pela equação 8:

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 \cdot m_3}$$

$$\frac{10}{2,5} = \frac{2,33 - SN_2}{0,14 \cdot 1}$$

$$SN_2 = 1,77$$

Assim, a espessura da camada de revestimento foi de 9 cm, como mostrado na equação 6. Esse valor atende ao requisito de espessura mínima da AASHTO (1993).

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1}$$

$$D_1 = \frac{1,55}{0,44} = 3,53'' = 9 \text{ cm}$$

De acordo com a equação 6, a espessura da base deve ser de 4 cm.

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 \cdot m_2}$$

$$D_2 = \frac{1,77 - 1,55}{0,17 \cdot 1} = 1,3'' \cong 4 \text{ cm}$$

4.3.2 RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS PARA OS DIFERENTES PERÍODOS DE PROJETO ADOTADOS

De forma semelhante, efetuaram-se os passos descritos anteriormente para os períodos de projeto de 20, 30, 40 e 50 anos, e seus respectivos valores de número N. Assim, os valores das espessuras das camadas para cada período de projeto e tipo de pavimento estão descritos na Tabela 17.

Tabela 20 – Resumo do dimensionamento para os diferentes períodos de projeto.

Período de projeto	CBR	Tráfego	Camadas	Espessura (pavimento s/geogrelha)(cm)	Espessura (pavimento c/geogrelha)(cm)
10 anos	10%	$1 \cdot 10^6$	Revestimento	10	9
			Base	15	4
			Sub-base	10	10
20 anos	10%	$2,2 \cdot 10^6$	Revestimento	12	11
			Base	15	5
			Sub-base	10	10
30 anos	10%	$5,0 \cdot 10^6$	Revestimento	14	12
			Base	15	6
			Sub-base	10	10
40 anos	10%	$8,2 \cdot 10^6$	Revestimento	15	13
			Base	15	7
			Sub-base	10	10
50 anos	10%	$2,0 \cdot 10^7$	Revestimento	17	15
			Base	15	9
			Sub-base	10	10

Fonte: O autor (2017).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados na seção anterior mostram que o emprego de geogrelha na camada de base reduz a espessura tanto da camada de base como da camada de revestimento. Nesse sentido, elaborou-se o orçamento dessas camadas para os diferentes períodos de projeto utilizados no dimensionamento. É importante salientar que não foram considerados no orçamento os materiais e serviços comuns aos dois tipos de pavimentos dimensionados. Assim, a camada de sub-base, a imprimação e outros serviços comuns aos dois pavimentos não foram orçados. Dessa maneira, o custo apresentado no orçamento refere-se apenas às camadas de base e revestimento, que são as camadas que possuem diferenças de espessuras entre os tipos de pavimentos dimensionados.

Os valores utilizados no orçamento são de origem do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do ano de 2016 para o estado de Alagoas. No entanto, como não há um valor referencial estabelecido pelo SICRO (2016) para o material geossintético, foi utilizado o custo da geogrelha fornecido por empresas que fabricam esses materiais. Além disso, utilizou-se o valor referente ao transporte de material betuminoso a quente apresentado no Projeto Básico (Alagoas, 2009) corrigido para o ano de 2016 através da Calculadora do Cidadão (Banco Central do Brasil, 2017). Nesse sentido, é importante salientar que não foi possível utilizar os valores para o ano de 2009, ano em que foi elaborado o Projeto Básico, pois tais valores não estão disponíveis na Plataforma do SICRO. Dessa maneira, o orçamento não demonstra a realidade para o ano de 2010, mas é capaz de demonstrar a viabilidade econômica da utilização da geogrelha, através do comparativo entre os custos dos dois tipos de pavimento para cada período de projeto.

O projeto possui algumas particularidades no que se refere à aquisição de materiais. De acordo com o Projeto Básico, o material betuminoso deverá ser transportado do Município de Candeias – Bahia, distante 505 km da obra, e os agregados britados deverão ser transportados da pedreira MIBASA, em Belo Monte – Alagoas, distante 135 km da obra.

A composição do Concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ) considerada tem como base as porcentagens apresentadas no item 2S0254051 do SICRO 2 (2016), onde 83,70% do peso do material corresponde à brita, 5,5% corresponde ao cimento asfáltico CAP 50/70, 8% corresponde à areia e 2,8% corresponde ao filler. As porcentagens

referentes à brita e ao cimento asfáltico foram utilizadas para calcular a quantidade de material a ser transportado.

Para a elaboração do orçamento, foi necessário converter o volume em metro cúbico de CBUQ e brita para toneladas. Assim, para a conversão do volume em metro cúbico de CBUQ em toneladas, considerou-se densidade de $2,4 \text{ t/m}^3$ como recomendado pelo DNIT (2010), enquanto utilizou-se a densidade de $1,78 \text{ t/m}^3$ de brita graduada como recomendado pela Cooperativa de Pesquisas Tecnológicas e Industriais (s. d. apud SINDIBRITA, s. d.). Os resultados para camada período de projeto são apresentados na Figura 14.

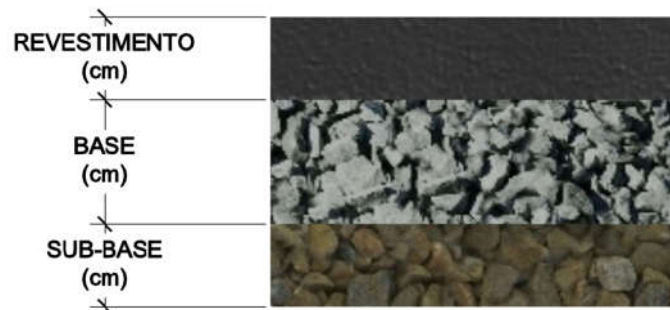


Figura 14 - Representação das camadas do pavimento. Fonte: O autor (2017).

5.1 PERÍODO DE PROJETO DE 10 ANOS

Para o período de projeto de 10 anos, as reduções de espessura nas camadas foram da ordem de 1,0 centímetro na camada de revestimento, e 11 centímetros na camada de base através da aplicação da geogrelha, como mostrado na Figura 15.

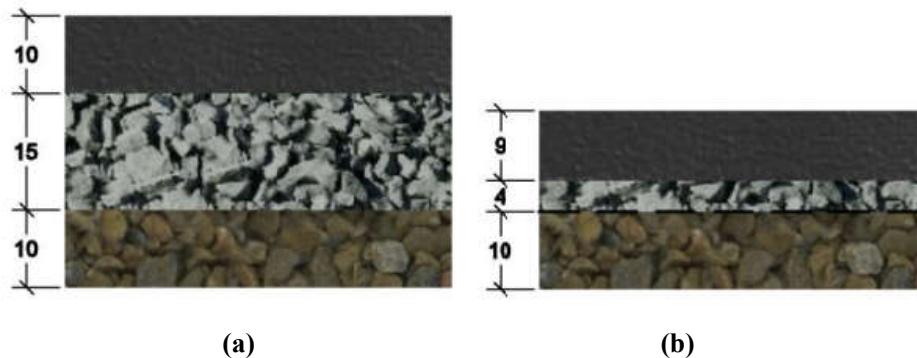


Figura 15- (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base. Fonte: O autor (2017).

A Tabela 18 e a Tabela 19 apresentam o orçamento das camadas de revestimento e base, para o período de projeto de 10 anos, do pavimento convencional e do pavimento com a utilização da geogrelha, respectivamente.

Tabela 21 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 10 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	13.440	102,05	1.371.552,00
SICRO	Base de brita graduada com brita comercial	m ³	8.400	185	1.554.000,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const) (Brita)	tkm	2.018.520	0,79	1.594.630,80
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	739,2	455,55	336.742,56
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	1.518.652,8	0,79	1.199.735,71
SICRO II	Areia comercial	m ³	632,47	50,15	31.718,40
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	48.384	0,79	38.223,36
TOTAL					6.126.602,83

Fonte: O autor (2017).

Tabela 22 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 10 anos.

(continua)

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	12.096	102,05	1.234.396,80
SICRO	Base de brita graduada com brita comercial	m ³	2.240	185	414.400,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const)	tkm	538.272	0,79	425.234,88

Fonte: O autor (2017).

Tabela 23 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 10 anos.

(conclusão)

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
FORNECEDOR	GEOGRELHA	m ²	56.000	19,9	1.114.400,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	665,28	455,55	303.068,30
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	1.366.787,52	0,79	1.079.762,14
SICRO II	Areia comercial	m ³	569,22	50,15	28.546,56
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	43.545,6	0,79	34.401,02
TOTAL					4.634.209,71

Fonte: O autor (2017).

Apresentados os valores dos orçamentos, evidencia-se uma economia de R\$ 1.492.393,12 com a utilização da geogrelha, que corresponde a uma redução em torno de 24% dos custos com os materiais apresentados no orçamento.

5.2 PERÍODO DE PROJETO DE 20 ANOS

Para o período de projeto de 20 anos, as reduções de espessura nas camadas foram de 1,0 centímetro na camada de revestimento e 10,0 centímetros na camada de base através da aplicação da geogrelha, como mostrado na Figura 16.

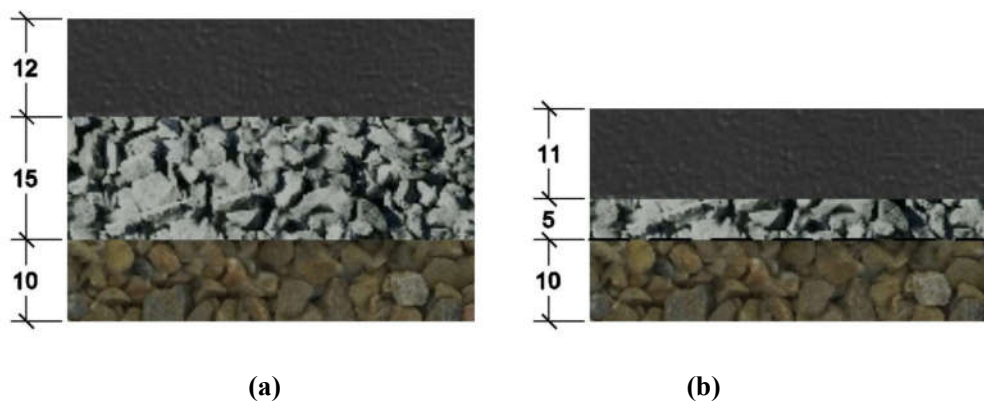


Figura 16 - (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base. Fonte: O autor (2017).

O orçamento das camadas de revestimento e base, para o período de projeto de 20 anos, do pavimento convencional e do pavimento com a utilização da geogrelha está apresentado na Tabela 20 e na Tabela 21, respectivamente.

Tabela 24 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 20 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	16.128	102,05	1.645.862,40
SICRO	Base de brita graduada com brita comercial	m ³	8.400	185	1.554.000,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const)	tkm	2.018.520	0,79	1.594.630,80
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	887,04	455,55	404.091,07
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	1.822.383,36	0,79	1.439.682,85
SICRO II	Areia comercial	m ³	758,96	50,15	38.062,08
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	58.060,8	0,79	45.868,03
TOTAL					6.722.197,23

Fonte: O autor (2017).

Tabela 25 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 20 anos.

(continua)

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	14.784	102,05	1.508.707,20
SICRO	Base de brita graduada com brita comercial	m ³	2.800	185	518.000,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const)	tkm	378.000	0,79	298.620,00

Fonte: O autor (2017).

Tabela 26 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 20 anos.

(conclusão)

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
FORNECEDOR	GEOGRELHA	m ²	56.000	19,9	1.114.400,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	813,12	455,55	370.416,82
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	1670518,08	0,79	1.319.709,28
SICRO II	Areia comercial	m ³	695,71	50,15	34.890,24
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	53.222,4	0,79	42.045,69
TOTAL					5.206.789,23

Fonte: O autor (2017).

Apresentados os valores dos orçamentos, observa-se uma economia de R\$ 1.515.408,00 com a utilização da geogrelha, que corresponde a uma redução de aproximadamente 22,5% dos custos com os materiais apresentados no orçamento.

5.3 PERÍODO DE PROJETO DE 30 ANOS

Para o período de projeto de 30 anos, as reduções de espessura nas camadas foram de 2,0 centímetros na camada de revestimento e 9,0 centímetros na camada de base através da aplicação da geogrelha, como mostrado na Figura 17.

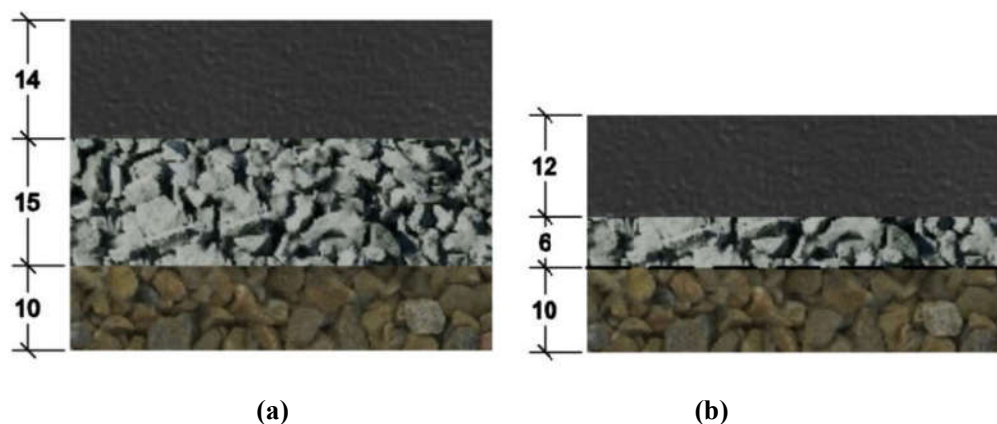


Figura 17 - (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base. Fonte: O autor (2017).

A Tabela 22 e a Tabela 23 apresentam o orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional e do pavimento com a utilização da geogrelha, respectivamente, para um período de projeto de 30 anos.

Tabela 27 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 30 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	18.816	102,05	1.920.172,80
SICRO	Base de brita graduada com brita comercial	m ³	8.400	185	1.554.000
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const)	tkm	2.018.520	0,79	1.594.630,80
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	1.034,88	455,55	471.439,58
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	2.126.113,92	0,79	1.679.629,99
SICRO II	Areia comercial	m ³	885,45	50,15	44.405,76
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	67.737,6	0,79	53.512,70
TOTAL					7.317.791,64

Fonte: O autor (2017).

Tabela 28 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 30 anos.

(continua)

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	16.128	102,05	1.645.862,40
SICRO	Base de brita graduada com brita comercial	m ³	3.360	185	621.600,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const)	tkm	807.408	0,79	637.852,32

Fonte: O autor (2017).

Tabela 29 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 30 anos.

(conclusão)

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
FORNECEDOR	Geogrelha	m ²	56.000	19,9	1.114.400,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	887,04	455,55	404.091,07
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	1.822.383,36	0,79	1.439.682,85
SICRO II	Areia comercial	m ³	758,96	50,15	38.062,08
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	58.060,8	0,79	45.868,03
TOTAL					5.947.418,76

Fonte: O autor (2017).

De acordo com os orçamentos do projeto para vida útil de 30 anos, evidencia-se uma economia de R\$ 1.370.372,88 com a utilização da geogrelha, que corresponde a uma redução de aproximadamente 19% dos custos com os materiais apresentados no orçamento. Dessa maneira, verifica-se que houve um declínio na porcentagem de redução dos custos em relação aos períodos de projeto de 10 e 20 anos, mas, ainda assim, a utilização da geogrelha é viável para o projeto.

5.4 PERÍODO DE PROJETO DE 40 ANOS

Para o período de projeto de 40 anos, as reduções de espessura nas camadas foram de 2,0 centímetros na camada de revestimento e 8,0 centímetros na camada de base através da aplicação da geogrelha, como mostrado na Figura 18.

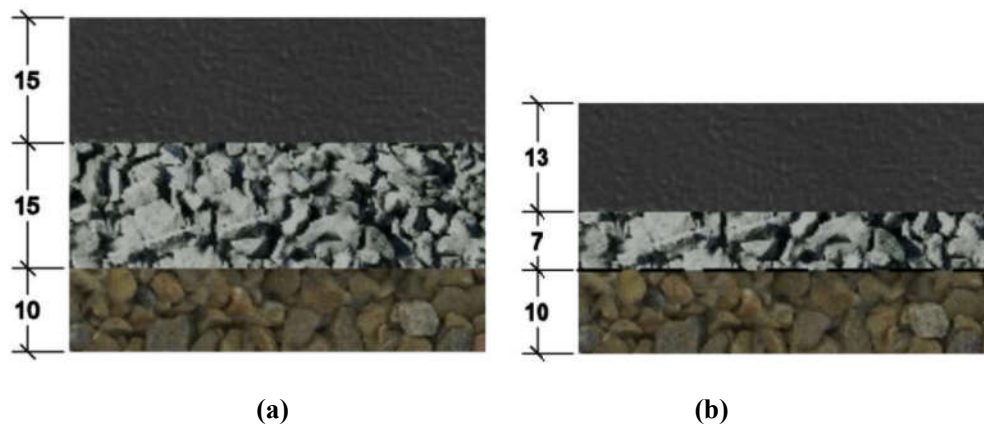


Figura 18 - (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base. Fonte: O autor (2017).

O orçamento das camadas de revestimento e base, para o período de projeto de 40 anos, do pavimento convencional e do pavimento com a utilização da geogrelha está apresentado na Tabela 24 e na Tabela 25, respectivamente.

Tabela 30 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 40 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	20.160	102,05	2.057.328,00
SICRO	Base de brita graduada com brita comercial	m ³	8.400	185	1.554.000,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const)	tkm	2.018.520	0,79	1.594.630,80
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	1.108,8	455,55	505.113,84
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	2.277.979,2	0,79	1.799.603,57
SICRO II	Areia comercial	m ³	948,70	50,15	47.577,60
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	72.576	0,79	57.335,04
TOTAL					7.615.588,85

Fonte: O autor (2017).

Tabela 31 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 40 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	17.472	102,05	1.783.017,60
SICRO	Base de brita graduada com brita comercial	m ³	3.920	185	725.200,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const)	tkm	941.976	0,79	744.161,04
FORNECEDOR	GEOGRELHA	m ²	56.000	19,9	1.114.400,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	960,96	455,55	437.765,33
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	1.974.248,64	0,79	1.559.656,43
SICRO II	Areia comercial	m ³	822,21	50,15	41.233,92
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	62.899,2	0,79	49.690,36
TOTAL					6.455.124,68

Fonte: O autor (2017).

Os orçamentos para o período de 40 anos revelaram uma economia de R\$ 1.160.464,16 com a utilização da geogrelha, que corresponde a uma redução em torno de 15% dos custos com os materiais apresentados no orçamento. Dessa maneira, nota-se que houve um declínio ainda maior na porcentagem de redução dos custos em relação aos períodos de projeto de 10 e 20 e 30 anos, porém, ainda nestas condições, a utilização da geogrelha é viável para o projeto.

5.5 PERÍODO DE PROJETO DE 50 ANOS

Para o período de projeto de 50 anos, as reduções de espessura nas camadas foram de 2,0 centímetros na camada de revestimento e 6,0 centímetros na camada de base através da aplicação da geogrelha, como mostrado Figura 19.

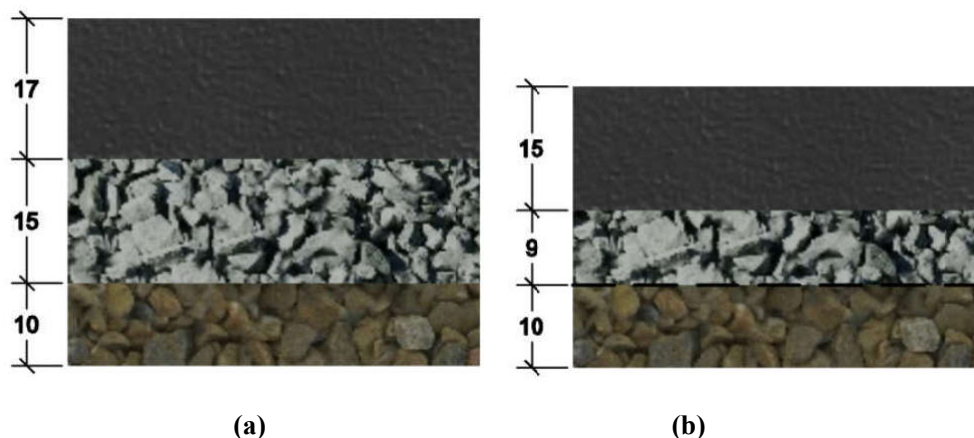


Figura 19 - (a) Espessura das camadas do pavimento convencional; (b) Espessura das camadas do pavimento com a utilização de geogrelha na camada de base. Fonte: O autor (2017).

A Tabela 26 e a Tabela 27 apresentam o orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional e do pavimento com a utilização da geogrelha, respectivamente, para um período de projeto de 50 anos.

Tabela 32 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento convencional para o período de projeto de 50 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	22.848	102,05	2.331.638,40
SICRO	Base de brita graduada com brita produzida	m ³	8.400	185	1.554.000,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const)	tkm	2.018.520	0,79	1.594.630,80
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	1.256,64	455,55	572.462,35
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	2.581.709,76	0,79	2.039.550,71
SICRO II	Areia comercial	m ³	1.075,2	50,15	53.921,28
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	82.252,8	0,79	64.979,71
TOTAL					8.211.183,25

Fonte: O autor (2017).

Tabela 33 - Orçamento das camadas de revestimento e base do pavimento com a utilização de geogrelha para o período de projeto de 50 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	20.160	102,05	2.057.328,00
SICRO	Base de brita graduada com brita produzida	m ³	5.040	185	932.400,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const)	tkm	1.211.112,00	0,79	956.778,48
FORNECEDOR	GEOGRELHA	m ²	56.000	19,9	1.114.400,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSICO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	1.108,8	455,55	505.113,84
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	2.277.979,2	0,79	1.799.603,57
SICRO II	Areia comercial	m ³	948,70	50,15	47.577,60
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	72.576	0,79	57.335,04
TOTAL					7.470.536,53

Fonte: O autor (2017).

Para o tempo de projeto de 50 anos, a economia foi de R\$ 740.646,73 com a utilização da geogrelha, que corresponde a uma redução em torno de 9% dos custos com os materiais apresentados no orçamento. Dessa forma, a redução dos custos não é tão expressiva. No entanto, além de ainda ser economicamente viável, a aplicação da geogrelha também reduziria significativamente o tempo de execução da obra, uma vez que camadas mais espessas requerem um tempo maior de execução.

5.6 COMPARATIVO ENTRE O ORÇAMENTO APRESENTADO NO PROJETO BÁSICO

O pavimento dimensionado no Projeto Básico utilizou o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT para um período de projeto de 10 anos, onde os valores apresentados no orçamento correspondem ao ano de 2009. Assim, como não foi possível fazer o orçamento com os valores para o ano de 2009 dos pavimentos

dimensionados neste trabalho, foi necessário corrigir os valores do orçamento do Projeto Básico através da Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil, a fim de comparar os custos entre os pavimentos dimensionados neste trabalho para 10 anos de período de projeto e o pavimento apresentado no Projeto Básico.

Dentro desse contexto, todo o serviço de pavimentação foi orçado em R\$ 3.271.309,72 para o pavimento dimensionado no Projeto Básico pelo método do DNIT no ano de 2009 (Figura 20). Esse valor corrigido para o ano de 2016 corresponde a R\$ 5.335.282,07 (Figura 21).

CETERA
CONSULTORIA E PROJETOS LTDA.

OBRA : Restauração de Rodovia

TRECHO : Entr. BR-423 / Delmiro
Gouveia / AL -220

RODOVIA : Acesso à Delmiro Gouveia

EXTENSÃO : 8,00 km

ITEM	SERVIÇO	CUSTO TOTAL	
		(R\$)	(%)
1.0	SERVIÇOS PRELIMINARES	81.216,04	1,15
2.0	SERVIÇOS TÉCNICOS	256.336,24	3,63
3.0	TERRAPLENAGEM	1.591.378,67	22,52
4.0	PAVIMENTAÇÃO	3.271.309,72	46,28
5.0	DRENAGEM	1.028.738,94	14,56
6.0	OBRAS D'ARTE CORRENTE	98.466,82	1,39
7.0	OBRAS D'ARTE ESPECIAL	294.970,41	4,17
8.0	OBRAS COMPLEMENTARES	251.458,20	3,56
9.0	PROTEÇÃO AMBIENTAL	194.032,60	2,75
		7.067.907,64	100,00

Figura 20 - Custo Total dos Serviços de Pavimentação apresentados no Projeto Básico.
Fonte: Alagoas (2009).

Resultado da Correção pelo IGP-M (FGV)

Dados básicos da correção pelo IGP-M (FGV)	
Dados informados	
Data inicial	12/2009
Data final	12/2016
Valor nominal	R\$ 3.271.309,72 (REAL)
Dados calculados	
Índice de correção no período	1,6309315
Valor percentual correspondente	63,0931500 %
Valor corrigido na data final	R\$ 5.335.282,07 (REAL)

Figura 21 - Correção do custo de pavimentação apresentado no Projeto Básico para o ano de 2016. Fonte: Banco Central (2017).

Neste trabalho, para um período de projeto de 10 anos, o custo do pavimento convencional pelo método da AASHTO (1993) é de R\$ 6.912.013,47 (Tabela 28). Dessa maneira, constata-se que o custo do pavimento dimensionado pelo método da AASHTO é mais oneroso. O custo do pavimento com a utilização do reforço com geogrelha na camada de base foi de R\$ 5.419.620,07 (Tabela 29), sendo esse valor também superior ao custo do pavimento dimensionado pelo método do DNIT apresentado no Projeto Básico. No entanto, a camada de base dos pavimentos dimensionados nesse trabalho é composta por material mais resistente e mais oneroso (brita graduada), enquanto que o pavimento dimensionado no Projeto Básico utiliza base de solo. Além disso, a camada de revestimento é mais espessa, o que também torna o pavimento mais resistente, porém mais oneroso.

Dessa maneira, verifica-se que os pavimentos dimensionados neste trabalho para o período de projeto de 10 anos possuem custos mais elevados que o pavimento dimensionado no Projeto Básico, para o mesmo período de projeto. Entretanto, segundo Gonçalves (2017), o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT não prevê o surgimento de possíveis trincas e rachaduras no pavimento com o passar dos anos. A partir de 2018, o novo método do DNIT passará a considerar tais previsões, entre outros fatores (ibid.).

Tabela 34 - Orçamento do pavimento dimensionado pelo método da AASHTO (1993) para o período de projeto de 10 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	13.440	102,05	1.371.552,00
SICRO	Base de brita graduada com brita produzida	m ³	8.400	185	1.554.000,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const) (Brita)	tkm	2.018.520	0,79	1.594.630,80
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	739,2	455,55	336.742,56
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	1.518.652,8	0,79	1.199.735,71
SICRO II	Areia comercial	m ³	632,47	50,15	31.718,40
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m3 rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	48.384	0,79	38.223,36
SICRO II	Sub-base solo estabilizado granul. s/ mistura	m ³	5.600	13,18	73.808,00
SICRO II	Pintura de Ligação	m ²	112.000	0,22	24.640,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Aquisição de Emulsão Asfáltica	t	56	1.859,36	104.124,16
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transporte de Emulsão asfáltica	t	56	410,23	22.972,88
SICRO II	Imprimação	m ²	112.000	0,32	35.840,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Asfalto Diluído	t	134,4	3.488,77	468.890,69
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transporte de Asfalto Diluído	t	134,4	410,23	55.134,91
TOTAL					6.912.013,47

Fonte: O autor (2017).

Tabela 35 - Orçamento do pavimento com a utilização de geogrelha dimensionado pelo método modificado da AASHTO (1993) para o período de projeto de 10 anos.

Origem	Discriminação	Un.	Quant.	Custo Un.	Custo
SICRO 2	CBUQ -capa de rolamento AC/BC	t	12.096	102,05	1.234.396,80
SICRO	Base de brita graduada com brita produzida	m ³	2.240	185	414.400,00
SICRO 2	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const)	tkm	538.272	0,79	425.234,88
FORNECEDOR	GEOGRELHA	m ²	56.000	19,9	1.114.400,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transp. Material betuminoso (CAP 50/70)	tkm	665,28	455,55	303.068,30
SICRO 2	Transporte Agregados para CBUQ	tkm	1.366.787,52	0,79	1.079.762,14
SICRO II	Areia comercial	m ³	569,22	50,15	28.546,56
SICRO II	Transp. local c/ base. 10m ³ rodov. não pav (const) (Areia)	tkm	43.545,6	0,79	34.401,02
SICRO II	Sub-base solo estabilizado granul. s/ mistura	m ³	5.600	13,18	73.808,00
SICRO II	Pintura de Ligação	m ²	112.000	0,22	24.640,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Aquisição de Emulsão Asfáltica	t	56	1859,36	104.124,16
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transporte de Emulsão asfáltica	t	56	410,23	22.972,88
SICRO II	Imprimação	m ²	112.000	0,32	35.840,00
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Asfalto Diluído	t	134,4	3.488,77	468.890,69
CORRIGIDO DO PROJETO BÁSIO	Transporte de Asfalto Diluído	t	134,4	410,23	55.134,91
TOTAL					5.419.620,4

Fonte: O autor (2017).

Com isso, verifica-se que os pavimentos dimensionados pelo método da AASHTO (1993), apesar de serem mais onerosos, são mais resistentes, pois possuem camadas de revestimento mais espessas (Figura 22) e materiais mais resistentes na camada de base.

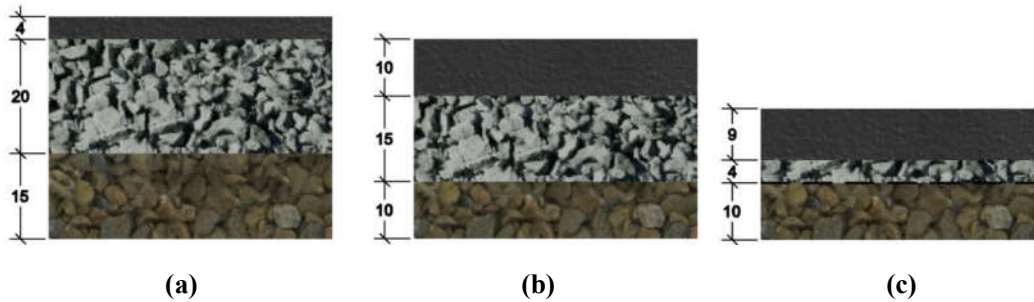


Figura 22 - (a) Espessura das camadas do pavimento pelo método do DNIT; (b) Espessura das camadas do pavimento pelo método da AASHTO (1993); (c) Espessura das camadas do pavimento pelo método da modificado da AASHTO (1993). Fonte: O Autor (2017).

6. CONCLUSÃO

Os materiais geossintéticos podem ser aplicados em diversos tipos de obras e desempenham diferentes funções. Nesse sentido, as geogrelhas, quando aplicadas em camada de base de pavimentos, reduzem a espessura da mesma, podendo ser uma alternativa econômica e ecológica.

Os resultados apresentados para o estudo de caso desenvolvido nesse trabalho evidenciam a importância da análise de viabilidade econômica, com o intuito de identificar a alternativa que melhor se adequa às condições particulares de cada obra. Assim, como o projeto analisado necessita de transporte de materiais por longas distâncias, constatou-se que o uso da geogrelha na camada de base dos pavimentos dimensionados pelo método da AASHTO é capaz reduzir os custos da pavimentação para todos os períodos de projeto analisados.

No entanto, o custo do pavimento utilizando geogrelha mostrou-se mais oneroso quando comparado ao custo do pavimento convencional apresentado no Projeto Básico, dimensionado pelo método do DNIT. Nesse sentido, ressalta-se que o pavimento apresentado no Projeto Básico tem espessura de revestimento mínima adotada para reduzir os custos, além de não utilizar fatores de previsão de trincas e rachaduras em seu dimensionamento.

Verificou-se, ainda, que a aplicação da geogrelha no projeto analisado expressa maior vantagem econômica para um período de projeto de 10 anos. Além disso, a partir de 10 anos, os orçamentos revelaram uma redução na economia viabilizada pela geogrelha. Esse fato pode ser justificado pelo que foi exposto na revisão bibliográfica acerca da pouca influência do uso da geogrelha em camadas mais espessas.

Com base nas análises apresentadas neste trabalho, enfatiza-se a importância do estudo da viabilidade técnica e econômica de materiais alternativos na construção civil. Dentro desse contexto, devido à escassez de materiais naturais de boa qualidade próximos aos locais das obras, os materiais alternativos, como os geossintéticos, podem desempenhar função importante tanto em relação aos aspectos estruturais, quanto em relação ao âmbito financeiro nos projetos de pavimentação rodoviária. Diante dessa realidade, os profissionais da área devem buscar realizar estudos de análise técnica e econômica, a fim de escolher, dentre as possibilidades, a alternativa que melhor se adequa à cada obra, visando aumentar a durabilidade das estruturas e otimizar gastos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Verificada a importância da avaliação de diferentes alternativas para os projetos de pavimentação rodoviária, através do uso de materiais inovadores, sugere-se a continuidade de trabalhos nessa área, por meio de estudos como:

- Análise técnica e econômica da aplicação de outros tipos de geossintéticos para a redução da espessura da camada de base;
- Estudo da viabilidade econômica da aplicação de geogrelha na camada de base com a utilização de materiais diferentes dos utilizados nesse trabalho;
- Avaliação econômica da aplicação de geossintéticos na camada de revestimento;
- Comparação do fator econômico proporcionado pelo uso de geogrelha em camada de base para diferentes tipos de solo (diferentes valores de CBR);
- Análise comparativa entre as deformações ocasionadas pelo tráfego em trechos de rodovia com a utilização de geogrelha e sem a utilização da geogrelha.

8. REFERÊNCIAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials -. **Guide for design Pavement Structures**. Washington, 1993.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12553 – Geossintéticos – Terminologia**. Brasil, 2003.

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Introdução. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Blucher, 2004. cap. 1.

VERTEMATTI, J. C. Reforço de Base de Pavimentos. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Blucher, 2004. cap. 4.9.

Alagoas – Secretaria do Estado de Infraestrutura. **Projeto Básico de Engenharia – Trecho Entr. BR-423/Delmiro Gouveia /Entr. AL-220**. Cetera:2009.

ANTUNES, L. G. S. (2008). **Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos**.
Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 166/08, Departamento de Engenharia Civil,
Universidade de Brasília, Brasília, DF.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. RIO DE JANEIRO: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

Brasil. **Calculadora do Cidadão – Banco Central do Brasil**. Disponível em:<www.bcb.gov.br>. Acesso em: 01 nov 2017.

CARMO, C. A. T.; MONTESTRUQUE, G. **Restauração do Pavimento da Rodovia MG-424 com geogrelha de poliéster**. In: 44ª Reunião Anual de Pavimentação e 18º ENACOR – Encontro Nacional De Conservação Rodoviária, 2015, Paraná. **Anais...** Paraná: 4ª ExpoPavimentação, 2015.

CNT – Confederação Nacional de Transporte. **Boletim Estatístico – 06 – 17**. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 02 nov 2017.

CNT – Confederação Nacional de Transporte. **Boletim Estatístico – 06 – 17**. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 02 nov 2017.

CONTRAN - Conselho Nacional De Trânsito. **RESOLUÇÃO N° 12/98**. Brasília, 1998.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **1º Caderno de Perguntas e Respostas**. Minas Gerais, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Sistema de Custos Referenciais de Obras - SICRO**. Alagoas, 2016.

FERREIRA, C.J. (2008). **“Avaliação estrutural de pavimento experimental reforçado com geogrelha”**. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos - SP.

GONÇALVES, E. **Dnit apresenta novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. CNT: 2017. Disponível em: < <http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em: 02 nov 2017.

GONÇALVES, M. M. N. G. **Avaliação da utilização de geossintéticos no dimensionamento de pavimentos rodoviários**. Lisboa: Técnico Lisboa, 2015.

KAKUDA, F.M.; PARREIRA, A.B. e FABBRI, G.T.P. (2011). “**Análise de um pavimento reforçado com geossintético a partir de resultados de ensaios em equipamentos de grandes dimensões**”. Revista Transportes v. 19, n. 3.

OSCAR, J.; SILVA, J. C. B. **Pavimentação Asfáltica**. São Paulo: Revista Techné, 2011. Disponível em: <www.technel7.pini.com.br>. Acesso em: 20 out. 2017.

REZENDE, L. R. **Geossintéticos na Engenharia Rodoviária**. IGS: Portugal, s.d.

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

SINDIBRITA - Sindicato da Indústria de Mineração de Brita. **Sistema de venda a peso**. Disponível em:< <http://www.sindibrita.org.br>>. Acesso em: 01 nov 2017.

VERTEMATTI, J. C. **Curso Básico de Geotêxteis**. ABINT: 2001.