



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII - ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE - CCTS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ALANNY LARISSA DA SILVA OLIVEIRA SOUSA

**O USO DE GEOSSINTÉTICOS COMO REFORÇO DE BASE DE PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS**

ARARUNA - PB

2017

ALANNY LARISSA DA SILVA OLIVEIRA SOUSA

**O USO DE GEOSSINTÉTICOS COMO REFORÇO DE BASE DE PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Pavimentação.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra.

ARARUNA – PB

2017

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S725u Sousa, Alanny Larissa da Silva Oliveira.
O uso de geossintéticos como reforço de base de pavimentos rodoviários [manuscrito] : / Alanny Larissa da Silva Oliveira Sousa. - 2017.
48 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2017.

"Orientação : Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Pavimento. 2. Geossintético. 3. Rodovias.

21. ed. CDD 625.8

ALANNY LARISSA DA SILVA OLIVEIRA SOUSA

**O USO DE GEOSSINTÉTICOS COMO REFORÇO DE BASE DE PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de Engenharia
Civil da Universidade Estadual da Paraíba,
como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

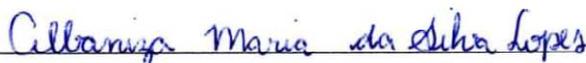
Área de Concentração: Pavimentação.

Aprovado em: 13/12/2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba



Prof. Me. Albaniza Maria da Silva Lopes
Universidade Estadual da Paraíba



Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti
Universidade Estadual da Paraíba

Aos meus pais, Antonio e Leonilda, minha base, fonte de inspiração, força e exemplo de vida. DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que esteve sempre presente me guiando, dando discernimento, saúde e força para ir em busca dos meus sonhos e superar todas as dificuldades.

Aos meus pais, Leonilda da Silva Oliveira Sousa e Antonio Batista de Sousa, que estiveram batalhando a todo momento, sem medir esforços, dando apoio, educação e carinho.

Ao meu irmão, Alysson Leônidas pelo companheirismo e por sempre acreditar em mim.

A minha avó, Creusa da Silva Oliveira (in memoriam), que sempre me incentivou e foi um exemplo para todos, e a toda minha família que de alguma forma contribuiu nessa minha caminhada.

A Maria Fernandes e José Sávio, que me deram total apoio e contribuíram para chegar onde hoje estou.

Ao meu Orientador Professor Dr. Raimundo Leidimar Bezerra, por me orientar durante este trabalho e jornada acadêmica

Aos meus colegas de curso, que me acompanharam nessa caminhada, proporcionando momentos de grande importância para a vida acadêmica e secular.

A todos os professores e funcionários do Campus VIII da UEPB, que me impulsionaram a galgar os degraus e somar conhecimento.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indiretamente na realização desse sonho, meus sinceros agradecimentos.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis. ”

JOSÉ DE ALENCAR

RESUMO

O aumento do tráfego nas rodovias exige uma melhoria na qualidade do pavimento buscando evitar a manifestação de patologias como: trincamento por fadiga do revestimento ou deformação permanente. O uso de alguns geossintéticos como reforço de base de pavimentos tem sido uma das soluções empregadas. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo bibliográfico sobre o uso do geossintético como elemento de reforço de base de pavimentos, apresentando os geossintéticos empregados, suas propriedades, aspectos relacionados aos mecanismos de interação, determinação de parâmetros e metodologias de dimensionamento. Foram apresentados os procedimentos de dimensionamento para rodovias não pavimentadas pelo método de Giroud e Han e para rodovias pavimentadas pelo método da AASHTO. De um modo geral à partir da combinação das propriedades do geossintético com as do solo e a interação entre eles podem-se obter vantagens como: aumento de vida útil das estruturas reforçadas, aumento na resistência do subleito, redução dos recalques diferenciais da rodovia, redução na espessura das camadas do pavimento, entre outros, obtendo assim melhor desempenho quando comparadas aos métodos tradicionais. Essa melhoria pôde ser comparada no exemplo de dimensionamento de um pavimento flexível, onde obteve-se como resultado para o pavimento sem reforço espessuras para camada de revestimento, base e sub-base de 23,44 cm, 15,24 cm e 32,5 cm respectivamente. Para o pavimento com reforço, obteve-se espessuras de 21,19 cm, 15,24 cm, e 29,14 cm, para a camada de revestimento, base e sub-base respectivamente.

Palavras-Chave: Pavimento. Geossintético. Reforço de base. Método AASHTO.

ABSTRACT

Traffic increase on the highways demands an improvement in pavement quality in order to avoid the emergence of pathologies such as: fatigue cracking of the coating or wheel track rutting. The use of some geosynthetics as pavement reinforcement has been one of the solutions employed. This work aims to present a bibliographical study about the use of geosynthetics as an element of pavement reinforcement, presenting geosynthetics employed, their features, aspects related to the interaction mechanisms, parameter determination, and design methodologies. The design procedures for unpaved roads by Giroud and Han's method, and paved roads by AASHTO method were presented. In general, from the combination of geosynthetic features with soil's features and the interaction between them, some advantages can be obtained, such as: increase of reinforced structures useful life, increase in subgrade resistance, reduction of the highway's differential pressures, reduction in the thickness of pavement layers, among others, thus obtaining better performance when compared to the traditional methods. This improvement could be compared in the example of dimensioning a flexible pavement where, was obtained as a result for the pavement without reinforcement for the surface course, base and sub-base courses 23,44 cm, 15,24 cm and 32,5 cm, of thickness respectively. For the pavement with reinforcement, was obtained 21,19 cm, 15,24 cm, and 29,14 cm of thicknesses for surface course, base and sub-base courses, respectively.

Keywords: Pavement. Geosynthetics. Reinforcement. AASHTO Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estruturas dos pavimentos. (Adaptado de BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006)	14
Figura 2 – Principais funções dos geossintéticos (Adaptado de IGS Brasil, 2015)	17
Figura 3 – Classificação dos principais geossintéticos (Adaptado de ABINT, 2001)	19
Figura 4 – Distribuição de tensões na camada de leito de um pavimento flexível. a) sem reforço geossintético; b) com reforço geossintético. (Adaptado de ZORNBERG, 2012)	21
Figura 5 – Princípio do solo reforçado (Adaptado de PALMEIRA, 1999).....	21
Figura 6 – Comportamento de tensão x deformação dos materiais (Adaptado de PALMEIRA, 1999).....	22
Figura 7 – Ensaio de faixa larga e características de tração de geossintéticos (Adaptado de PALMEIRA, 1999)	23
Figura 8 – Relação carga-deformação-taxa de deformação em ensaios de tração (Adaptado de PALMEIRA, 1999)	23
Figura 9 – Resultados de ensaios de fluência. (Adaptado de PALMEIRA, 1999).....	24
Figura 10 – Curva de referência (Adaptado de PALMEIRA, 1999).....	24
Figura 11 – Interação do solo-geossintético. a) solicitações em solo reforçado; b) Ensaio de arrancamento; c) Ensaio de cisalhamento direto em geotêxteis; d) Ensaio de cisalhamento direto em geogrelha. (Adaptado de FERREIRA, 2007).....	26
Figura 12 – Modelo de dimensionamento de reforço de uma rodovia não pavimentada. (Adaptado de ELIAS, 2004).....	29
Figura 13 – Modelo de dimensionamento de reforço de uma rodovia pavimentada. (Adaptado de ELIAS, 2004).....	30
Figura 14 - Curva típica de perda de serventia (PSI). (Adaptado de AASHTO, 1993)	33
Figura 15 – Distribuição das camadas do pavimento. (Adaptado de AASHTO, 1993).....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de confiabilidade recomendados. (Adaptado de AASHTO, 1993).....	34
Tabela 2 – Nível de confiabilidade e valor de ZR. (Adaptado de AASHTO, 1993).....	35
Tabela 3 – Valores de mi. (Adaptado de AASHTO, 1993).....	36
Tabela 4 – Espessuras mínimas recomendadas para cada camada do pavimento. (Adaptado de AASHTO, 1993).....	38
Tabela 5 - Espessura encontradas no dimensionamento.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

BCR - *Base Course Reduction*

CNT - Confederação Nacional do Transporte

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

FHWA - *Federal Highway Administration*

GA - Geomanta (GA):

GB - Geobarra (GB):

GP - Geotubo (GP):

GC - Geocomposto (GC):

GG - Geogrelha (GG):

GI - Geotira (GI)

GL - Geocélula (GL):

GM - Geomembrana (GM):

GMA - *Geosynthetic Materials Association*

GS - Geoespaçador (GS):

GT - Geotêxtil (GT):

IGS - *International Geosynthetic Society*

ISO - *International Organization for Standardization*

NBR – Norma Brasileira

PA - Poliamida

PE - Polietileno

PET - Poliéster

PP - Polipropileno

PSI - *Present Serviceability Index*

PVC - Policloreto de vinila

TBR - *Traffic Benefit Ratio*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	GEOSSINTÉTICOS	16
3.1	PRINCIPAIS FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS	17
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS	18
4	REFORÇO DE BASE DE PAVIMENTOS	20
5	REFORÇO DE BASE DE PAVIMENTOS UTILIZANDO GEOSSINTÉTICOS ...	21
5.1	PROPRIEDADES RELEVANTES DO REFORÇO	22
5.1.1	Resistência e rigidez à tração	22
5.1.2	Comportamento em fluência	23
5.1.3	Resistência a danos mecânicos de instalação	25
5.1.4	Durabilidade quanto à degradação ambiental (química e biológica)	25
5.1.5	Grau de interação com o solo envolvente	26
5.1.5.1	Ensaio de arrancamento	26
5.1.5.2	Ensaio de cisalhamento direto	27
5.2	VANTAGENS NO USO DE GEOSSINTÉTICOS EM BASES	27
6	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO UTILIZANDO GEOSSINTÉTICO COMO REFORÇO DE BASE	29
6.1	ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DO GEOSSINTÉTICO DE REFORÇO	30
6.2	RODOVIAS NÃO PAVIMENTADAS	31
6.3	RODOVIAS PAVIMENTADAS	32
6.4	EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO SEM REFORÇO (ADAPTADO DE TRICHÊS <i>ET AL.</i> 2015)	39
6.5	EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO COM REFORÇO (ADAPTADO DE TRICHÊS <i>ET AL.</i> 2015)	42
7	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do modal rodoviário no Brasil devido ao incremento da indústria automobilística e ao aumento do tráfego, com o passar dos anos, exigiu aumento da malha rodoviária pavimentada, dando predominância ao transporte rodoviário na movimentação de cargas e passageiros por todas as regiões do País (SENÇO, 1929).

A deficiência na qualidade da infraestrutura de transporte, traz a necessidade de aperfeiçoamento nessa área. É necessário o melhoramento da malha rodoviária brasileira que encontra-se em condições abaixo do esperado com relação ao conforto, desempenho, segurança e economia.

Segundo a pesquisa da Confederação Nacional do Transporte – CNT (2016), apesar do crescimento das extensões das rodovias, pode-se perceber que a densidade de malha rodoviária do Brasil ainda é muito pequena principalmente quando comparada com a de outros países de dimensão territorial semelhante. Segundo o Sistema Nacional de Viação – SNV, abrange 211.468 km de extensão, contrapondo-se aos 1.351.979 km de rodovias não pavimentadas.

A estrutura de pavimentos é constituída por camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento. A engenharia rodoviária subdivide as estruturas de pavimentos segundo a rigidez do conjunto: estruturas rígidas e flexíveis. Os pavimentos rígidos são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland apoiada geralmente sobre uma camada chamada sub-base, assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário. Os pavimentos flexíveis são compostos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas (BERNUCCI et al., 2006).

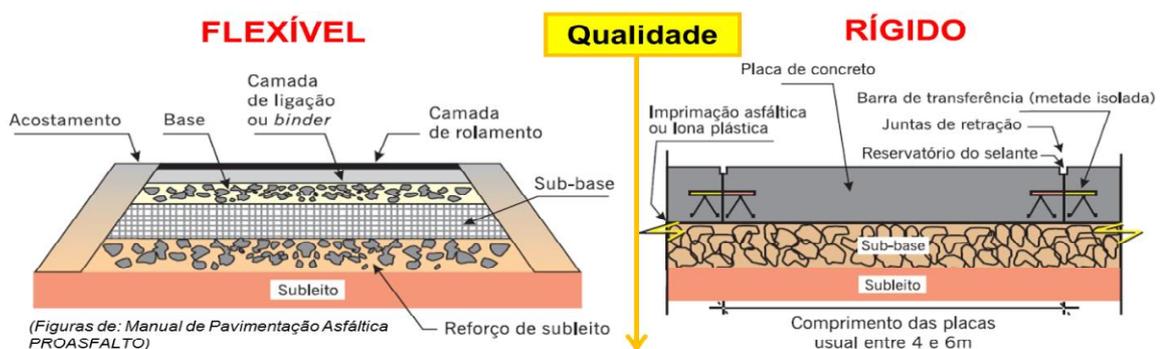


Figura 1 – Estruturas dos pavimentos. (Adaptado de BERNUCCI et al., 2006)

O pavimento tem como objetivo propiciar um tráfego confortável e seguro, suportando os esforços decorrentes das ações do tráfego combinados com as condições climáticas, sendo o mais econômico possível e garantindo um bom desempenho ao longo do período de vida útil. Porém, devido ao tempo de exposição ao tráfego, a excessos de cargas, agentes intempéricos e progresso de defeitos estruturais nas vias, surgem defeitos como trincas e afundamentos de trilha de roda nos pavimentos (BALBO, 2007).

O trincamento é um dano progressivo que pode ocorrer na aplicação de cargas intermitentes, tendo origem em fenômenos como a fadiga. Já os afundamentos são consequências da deformação permanente ou plástica.

Observando como características dos solos as variações granulométricas, grande variação de permeabilidade, baixa resistência à tração/cisalhamento, elevadas deformabilidades e tendo a necessidade de utilizá-lo em situações adversas, novas soluções geotécnicas se fazem necessárias para a redução desses problemas. A fim de expandir e garantir o desenvolvimento de vida útil do pavimento, busca-se desenvolver atividades que propiciam resultados satisfatórios, mediante o uso de tecnologias, diretamente ligadas a métodos de cálculo (projeto), análise e aprimoramento de materiais, bem como a inclusão e desenvolvimento de reforços (VERTEMATTI, 2015).

O reforço de base se faz necessário quando as tensões solicitantes não são suportadas pelo solo do subleito ou, caso seja necessário, a redução da espessura da camada de base. Uma das tecnologias empregadas no meio rodoviário para minimizar possíveis danos ao pavimento é a utilização de geossintéticos como camada de reforço de base.

A combinação de solo e geossintéticos apresenta diversas vantagens, tais como aumento da capacidade estrutural do pavimento, maior eficiência na redução de trilhas de rodas em pavimentos flexíveis além de reduzir ou evitar a reflexão de trincas.

O uso de geossintéticos no Brasil, vem crescendo continuamente, substituindo ou aprimorando técnicas, buscando economia e agilidade aos projetos, que devido sua versatilidade pode ser utilizado em diversas funções como reforço de solos, filtrações, contenções em obras hidráulicas, drenagens e separação de materiais. Para aplicação em reforço de base, a inclusão pode se posicionar a meia altura da camada ou na interface desta com o subleito e independentemente do local da inclusão, almeja-se uma maior distribuição de cargas e aumento da resistência do pavimento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão da bibliografia sobre o comportamento de geossintéticos como reforço de base de pavimentos em obras viárias e dos métodos de dimensionamento propostos na literatura.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a eficiência do uso de geossintéticos;
- Mostrar a função e atuação dos geossintéticos no reforço de base de pavimentos;
- Dimensionar, a título de exemplo, um sistema utilizando geossintéticos para rodovias pavimentadas com e sem reforço.

3 GEOSSINTÉTICOS

Segundo a NBR ISO 10318/2013, os geossintéticos são definidos como produtos industrializados, obtidos a partir de polímeros sintéticos ou naturais, e são utilizados combinados com solo e rocha em aplicações da engenharia geotécnica.

Após o desenvolvimento de polímeros como o policloreto de vinila (PVC), poliéster (PET), polietileno (PE), polipropileno (PP) e a poliamida (PA), foi possível para as indústrias têxtil o emprego de materiais sintéticos no melhoramento de solos.

A primeira aplicação de geossintéticos na engenharia geotécnica se deu na década de 1960 nos Estados Unidos com a aplicação de geotêxtil não-tecido de fibras em recapeamento asfáltico. No Brasil, as primeiras aplicações ocorreram em 1971, com o emprego de geotêxteis como reforço de aterros sobre solos de baixa capacidade portante. Desde então, tem despertado o interesse na utilização destes materiais, visto pelo seu crescimento contínuo devido sua versatilidade de funções e a facilidade na sua aplicação (VERTEMATTI, 2015).

Constituídos por polímeros e aditivos, caso necessário, os geossintéticos são inseridos em obras rodoviárias com o intuito de solucionar problemas, reforçando suas camadas e aumentando a vida útil do pavimento.

3.1 PRINCIPAIS FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos têm uma grande versatilidade quanto ao uso e funções. De acordo com a *International Geosynthetic Society* (IGS) (2015), as principais funções são:

- separação: atua na separação de duas camadas de solo, prevenindo a mistura dos materiais de naturezas diferentes;
- filtração: retenção de solos ou de outras partículas, permitindo a livre passagem do fluido através do solo;
- drenagem: coleta e condução de um fluido através de solos com menor permeabilidade;
- reforço: melhoramento das propriedades de resistência e de deformação do solo natural em uma estrutura geotécnica;
- barreira: atua como uma barreira impermeável para prevenir ou limitar a passagem de fluidos;
- controle de processos erosivos: evitar ou limitar a erosão superficial ocasionado pelo impacto de chuvas e escoamento superficial de fluidos.

Exemplos das principais funções apresentadas acima estão presentes na Figura 1.

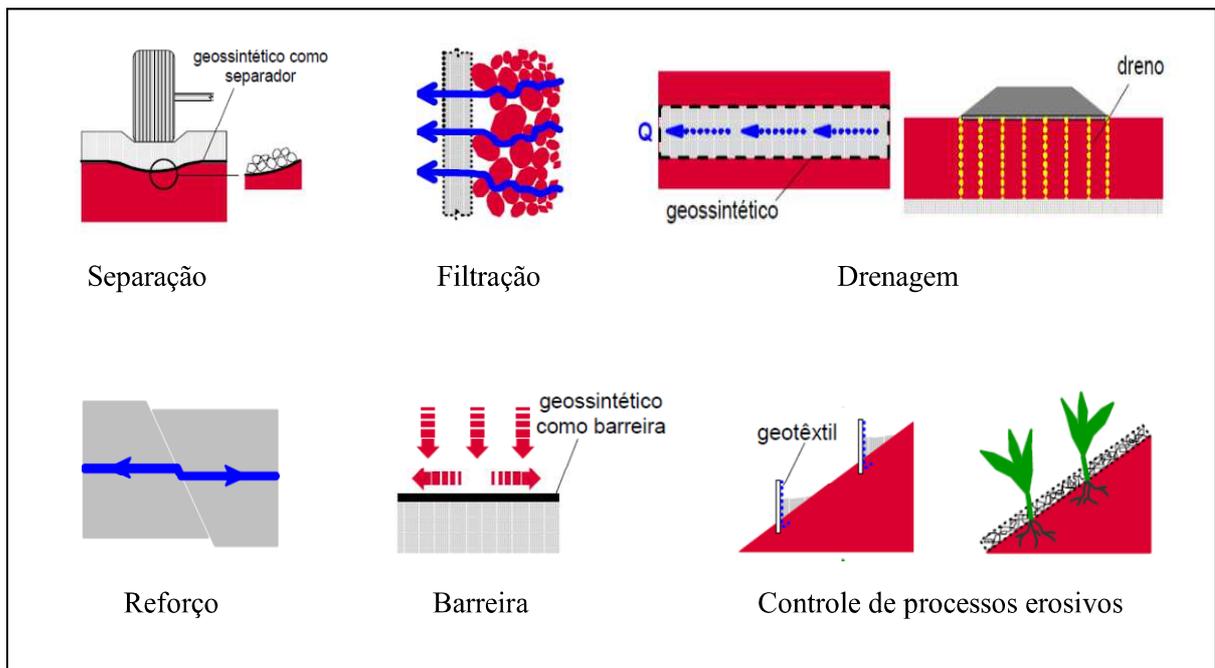


Figura 2 – Principais funções dos geossintéticos (Adaptado de IGS Brasil, 2015)

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Como vem crescendo continuamente o seu uso, tem sido desenvolvido novos geossintéticos diariamente. Dessa forma, ainda existem muitos sem uma devida definição e classificação. Os principais geossintéticos são classificados de acordo com a NBR ISO 10318/2013 como:

- Geotêxtil (GT): material têxtil bidimensional, permeável fabricado com polímero natural ou sintético, podendo ser tecido, não-tecido ou tricotado, utilizando-o de acordo com suas propriedades mecânicas e hidráulicas em obras geotécnicas;
- Geomembrana (GM): produto bidimensional, de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, utilizado para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação;
- Geocomposto (GC): material industrializado, formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar uma função específica;
- Geobarra (GB): geossintéticos em forma de barra como função predominante de reforço de solos;
- Geotira (GI): material polimérico na forma de uma tira, com largura inferior a 200 mm, com função predominante de reforço;
- Geoespaçador (GS): possui estrutura tridimensional à base de polímero, apresentando grande volume de vazios, empregado como elemento drenante;
- Georrede (GN): produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de drenagem;
- Geotubo (GP): produto de forma tubular com função drenante;
- Geomanta (GA): produto com estrutura tridimensional permeável constituída de monofilamentos poliméricos e/ou outros elementos, sintéticos ou naturais, usado para controle de erosão superficial do solo;
- Geocélula (GL): estrutura polimérica tridimensional, permeável, constituída de células interligadas, que confinam mecanicamente os materiais nelas inseridos;
- Geogrelha (GG): estrutura em forma de grelha, constituída por uma malha aberta de elementos resistentes à tração, que podem ser unidos por extrusão, solda ou entrelaçamento, e cujas aberturas são maiores que os elementos constituintes;

No emprego de geossintéticos em pavimentação, os mais utilizados são os geotêxteis, e as geogrelhas. São empregados em obras rodoviárias para reforços de camadas e aumento de vida útil do pavimento, podendo ter como objetivo, reforçar, separar, impermeabilizar e/ou proteger as camadas que o compõe.

Os geotêxteis, de acordo com o seu processo de fabricação, podem ser não-tecidos, tecidos ou agulhados. A escolha do tipo utilizado é conforme seu modo de utilização.

As geogrelhas têm sido planejadas de acordo com a solicitação aplicada, de modo que trabalhe da forma adequada à camada onde se inserem. Fibras de elevado módulo de elasticidade tem sido adicionada em sua fabricação para assegurar maior capacidade de absorção de forças para um reduzido valor de extensão.

Exemplos da classificação dos principais geossintéticos apresentadas acima estão presentes na Figura 2.



Figura 3 – Classificação dos principais geossintéticos (Adaptado de ABINT, 2001)

4 REFORÇO DE BASE DE PAVIMENTOS

Devido à grande variedade de solos existentes, problemas podem surgir ao se deparar com situações como solos orgânicos e argilas moles, pois são solos muito compressíveis e de baixa capacidade de suporte, entre outros não esperados. No Brasil, a maior parte dos pavimentos são classificados como flexíveis, com estrutura composta por revestimento asfáltico, camada de base, sub-base e reforço do subleito, assentadas sobre o subleito.

Segundo Trichês *et al.* (2015), ao se empregar camadas granulares diretamente sobre subleitos de baixa capacidade de suporte em algumas estruturas de pavimento flexíveis, podem surgir problemas como:

- redução de espessura e da resistência da camada granular pela cravação ou “agulhamento” do material granular no subleito ou na camada final de terraplanagem;
- heterogeneidade do estado da camada granular. Decorre de problemas nos serviços de compactação da camada granular, em consequência da baixa capacidade de suporte do subleito, e resulta em menor densificação da parte inferior da camada granular compactada que fica em contato com o subleito.

Manifestações de patologias como trincamento por fadiga do revestimento e afundamento de trilha de roda podem surgir com as combinações desses problemas. Soluções como a remoção e substituição de solo podem não ser a melhor opção devido fatores como custos elevados e dificuldades de execução. Uma forma de melhoramento de solo consiste na introdução de elementos resistentes convenientemente orientados que, de acordo com suas características aumentam a resistência e diminuem a deformabilidade do solo. Isso se dá por meio da transferência de esforços para os elementos resistentes.

Um desses elementos disponíveis no meio rodoviário é o geossintético. Sua utilização como camada de reforço de base de pavimento permite controlar ou até reduzir a um mínimo a manifestação dessas patologias.

Entre os geossintéticos existentes no mercado, os mais utilizados em reforço de pavimentos rodoviários são os geotêxteis e as geogrelhas.

Os geotêxteis são eficazes em situações em que as trincas delgadas não sejam originadas através da insuficiência na capacidade de suporte. As geogrelhas são indicadas para situações em que o trincamento tem origem na insuficiência da capacidade de carga da estrutura do pavimento onde sua função é reduzir as deformações horizontais no concreto

asfáltico. A inclusão pode ser posicionada tanto à meia altura da camada de base, quanto na interface desta com o subleito (BASTOS, 2010).

Segundo Ferreira (2007), geogrelhas são mais efetivas como reforço em relação aos geotêxteis, isso ocorre devido a interação geossintético-solo existente na abertura da malha. Entretanto, o geotêxtil é mais eficiente em relação à geogrelha como elemento de separação entre a camada de base e o subleito.

Com a inclusão dos geossintéticos, o pavimento ao sofrer uma tensão resulta uma melhor distribuição de carga, não se concentrando apenas no seu ponto de aplicação, como pode ser observado na Figura 3.

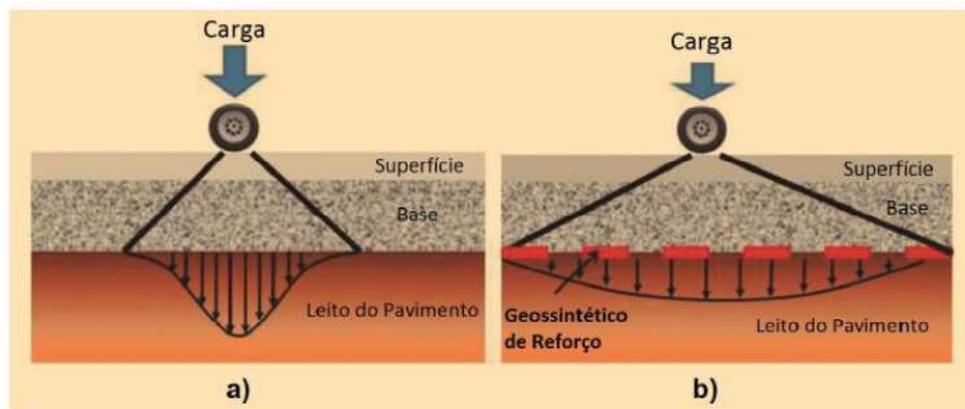


Figura 4 – Distribuição de tensões na camada de leito de um pavimento flexível. a) sem reforço geossintético; b) com reforço geossintético. (Adaptado de ZORNBERG, 2012)

5 REFORÇO DE BASE DE PAVIMENTOS UTILIZANDO GEOSSINTÉTICOS

A técnica de solo reforçado com geossintéticos consiste em camadas estreitamente espaçadas de reforço geossintético e material de enchimento granulado compactado. O reforço proporciona resistência à tração para o solo que é fraco nesse item, mas relativamente forte na compressão, onde o reforço restringe a deformação lateral do solo circundante, aumentando o seu confinamento, reduzindo a sua tendência à dilatação e, conseqüentemente, aumenta a rigidez e força da massa de solo (ADAMS *et al.*, 2011).

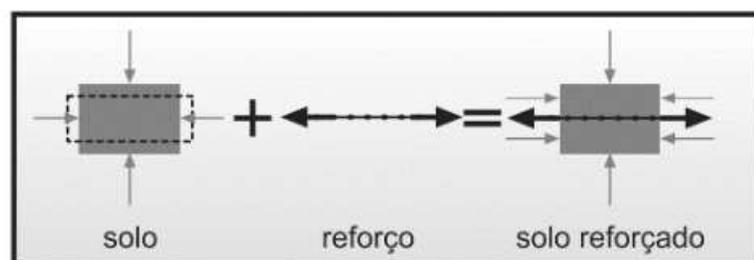


Figura 5 – Princípio do solo reforçado (Adaptado de PALMEIRA, 1999)

Quando combinadas as propriedades dos dois materiais e a interação entre eles podem-se obter vantagens técnicas, construtivas e econômicas quando comparadas aos métodos tradicionais, como pode ser observado na Figura 5.

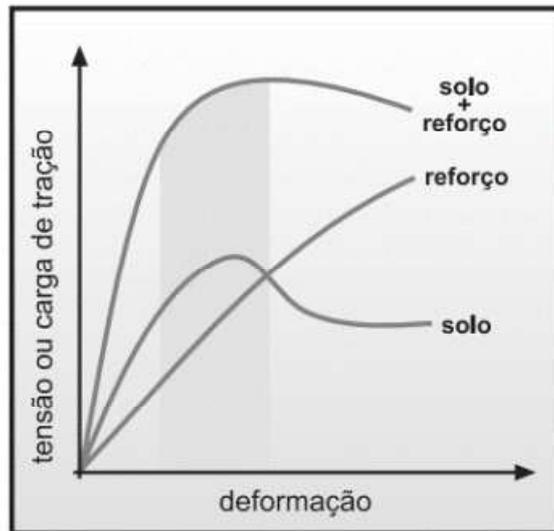


Figura 6 – Comportamento de tensão x deformação dos materiais (Adaptado de PALMEIRA, 1999)

5.1 PROPRIEDADES RELEVANTES DO REFORÇO

Segundo Palmeira (1999), para um geossintético desempenhar bem o papel de reforço em uma obra geotécnica, devem ser observadas as seguintes propriedades:

- resistência à tração;
- rigidez à tração (deformabilidade compatível com a do solo);
- comportamento em fluência;
- resistência a esforços de instalação;
- durabilidade quanto à degradação ambiental (química e biológica);
- elevado grau de interação com o solo envolvente.

5.1.1 Resistência e rigidez à tração

A resistência e rigidez à tração têm uma série de valores devido a variações das características e propriedades dos geossintéticos, as quais podem variar de acordo com o tipo de polímero utilizado na sua fabricação.

O método de ensaio normatizado pela NBR ISO 10318/2013, chamado de ensaio em faixa larga é o mais utilizado para se obter a resistência à tração (T_{max}) e da deformação na

ruptura (ϵ_{\max}), bem como da rigidez à tração (J) do geossintético. O esquema de como ocorre o ensaio e o gráfico de suas características pode ser observado nas Figuras 6 e 7.

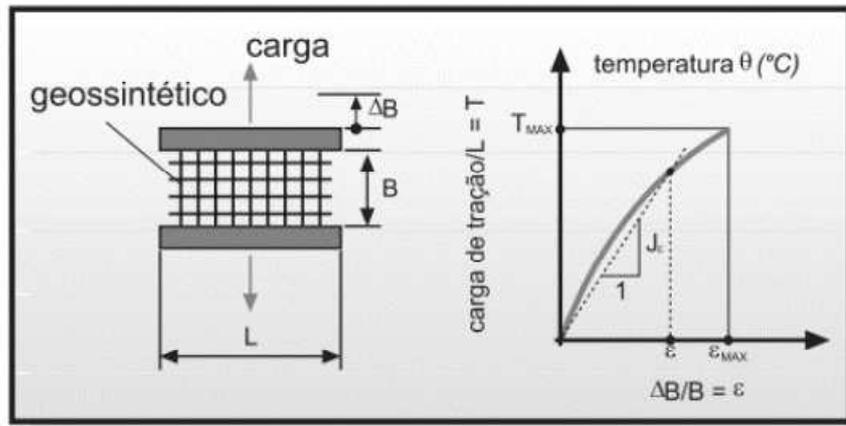


Figura 7 – Ensaio de faixa larga e características de tração de geossintéticos (Adaptado de PALMEIRA, 1999)

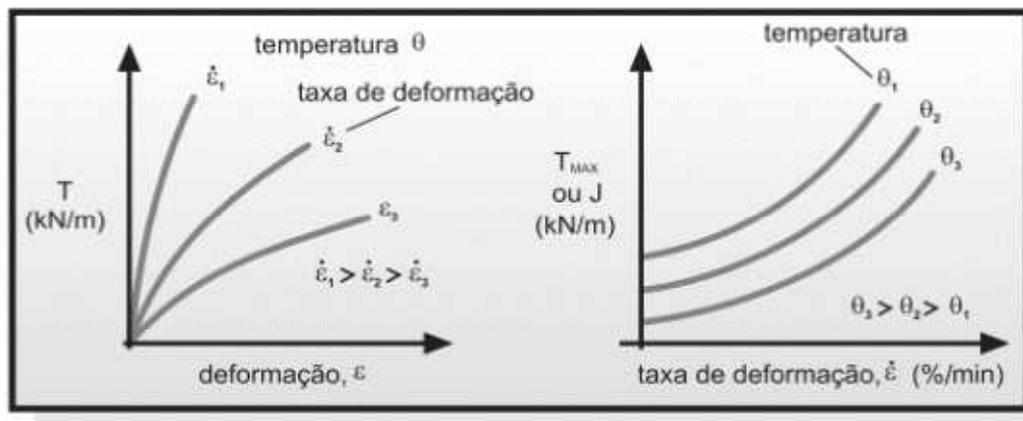


Figura 8 – Relação carga-deformação-taxa de deformação em ensaios de tração (Adaptado de PALMEIRA, 1999)

5.1.2 Comportamento em fluência

A fluência consiste na deformação que ocorre nos materiais quando submetidos a cargas constantes. A estabilidade do material quanto à fluência está relacionada com a ruptura brusca dos materiais após um longo período sob carga constante. Desse modo não há alterações significativas da resistência do material até que, inesperadamente, a resistência do material diminua rapidamente até ocorrer a ruptura (LOPES; LOPES, 2010).

Segundo Palmeira (1999), um fator de redução apropriado deve ser escolhido para sua aplicação na resistência à tração do geossintético, de modo que funcione sob uma carga de tração no campo para que não ocorra o rompimento por fluência durante a vida útil da obra.

O ensaio de fluência é regido pela ISO 13431/1999, que propõe métodos para a avaliação do comportamento em deformação e da ruptura por fluência, em tração não confinada. Corpos de provas são submetidos a carregamentos constantes que correspondem a uma parcela da resistência à tração, onde são registradas as deformações ocorridas ao longo de 1000 horas. Como a deformação está relacionada à carga de tração atuante, é possível obter-se curvas isócronas que relacionam a carga de tração com a deformação correspondente em um tempo, apresentadas na Figura 8.

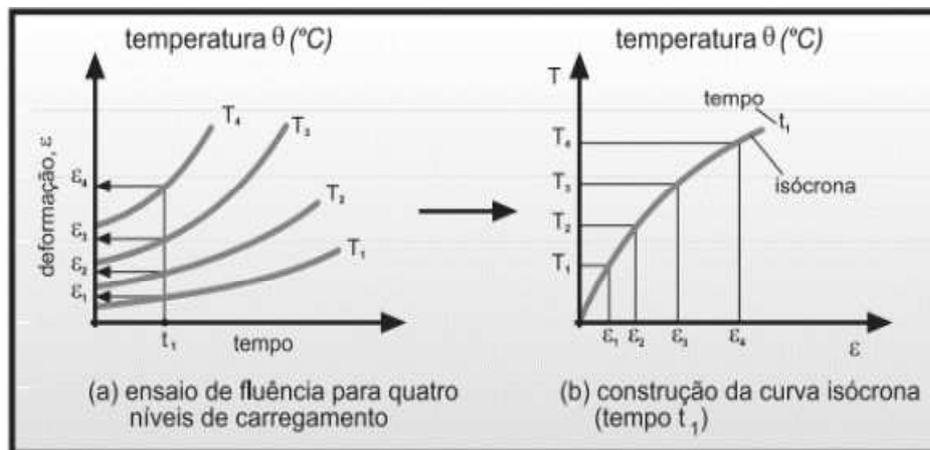


Figura 9 – Resultados de ensaios de fluência. (Adaptado de PALMEIRA, 1999)

No ensaio de ruptura por fluência, os corpos de provas são submetidos a carregamentos maiores, levando-os até sua ruptura. Também pode ser obtido através dos ensaios de fluência a curva de referência de propriedades do material conforme apresenta a Figura 9.

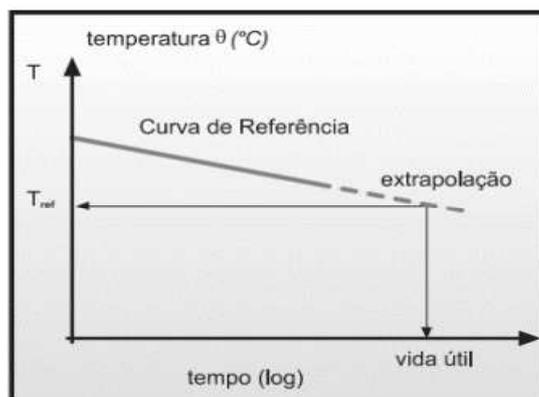


Figura 10 – Curva de referência (Adaptado de PALMEIRA, 1999)

5.1.3 Resistência a danos mecânicos de instalação

Esforços de instalação são aqueles que a camada de geossintético está submetida durante a sua instalação, o espalhamento e compactação do material de aterro. De um modo geral, quanto mais leve o geossintético, mais susceptível ele é a danos de instalação, então se faz necessário um cuidado para que haja um eficiente entrosamento entre ele e o solo (PALMEIRA, 1999).

Segundo Trichês et al. (2015), o procedimento executivo básico deverá seguir as seguintes etapas:

- deve-se proceder à remoção de agregados pontiagudos da superfície do subleito ou camada final de terraplanagem para evitar a perfuração do geotêxtil, no caso de seu emprego como elemento separador e filtrante;
- a fixação do geossintético, no caso de emprego do geotêxtil para separação e filtragem, pode ser realizada no sentido do tráfego, uma vez que nessa forma de aplicação as deformações que ocorrem nas emendas (costuras) não comprometem seu efetivo funcionamento. Já quando se aplica uma geogrelha para reforço da estrutura, ela deve ser estendida de preferência perpendicularmente à atuação do tráfego, evitando-se dessa forma as deformações originadas nas emendas;
- o transporte e o espalhamento do material granular devem ser preferencialmente realizados sem que os equipamentos trafeguem diretamente sobre o geossintético;
- a compactação da camada granular deve ser realizada em espessura máxima de compactação de 20,0 cm. No controle tecnológico de execução da camada granular deverão ser seguidas as especificações gerais do DNER/97.

5.1.4 Durabilidade quanto à degradação ambiental (química e biológica)

O geossintético deve garantir a conservação de suas características apresentadas no projeto, frente aos ataques provocados pelo meio ambiente. Segundo Paula (2003), a degradação química pode ser provocada através da ação do oxigênio, dos íons metálicos, dos ácidos, das bases, dos solventes e da água. Já a degradação biológica decorre por ação de microrganismos presentes.

É importante se garantir a durabilidade do elemento de reforço ao longo da vida útil da obra. Geossintéticos podem ser confeccionados com polímeros extremamente resistentes e duráveis à maioria das situações encontradas nos solos. Para o aumento de resistência à degradação ambiental pode ser adicionado um revestimento polimérico ao geossintético durante seu processo de fabricação (PALMEIRA, 1999).

5.1.5 Grau de interação com o solo envolvente

Para que a estrutura de solo reforçado se mantenha estável é necessário que ocorra a interação solo-geossintético, a qual depende das propriedades desses materiais, permitindo a transferência de tensões entre eles. Essas propriedades podem ser determinadas através de ensaios de laboratório, dos quais destacam-se os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento. Esses ensaios simulam solicitações que podem ocorrer em obras reforçadas típicas (PALMEIRA, 1999).

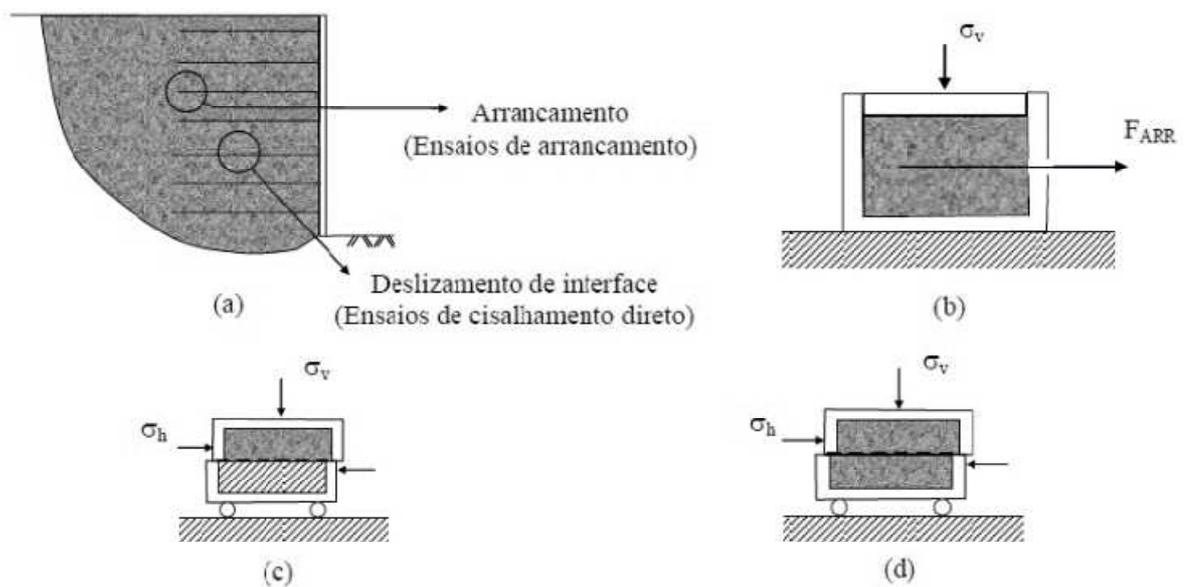


Figura 11 – Interação do solo-geossintético. a) solicitações em solo reforçado; b) Ensaio de arrancamento; c) Ensaio de cisalhamento direto em geotêxteis; d) Ensaio de cisalhamento direto em geogrelha. (Adaptado de FERREIRA, 2007)

5.1.5.1 Ensaio de arrancamento

Os ensaios de arrancamento normalmente são utilizados para analisar a resistência de interface de materiais rígidos. São utilizados equipamentos de cisalhamento direto através da adição de uma garra na extremidade para aplicação de um esforço de tração, medindo o

esforço de arrancamento e os deslocamentos do geossintético em determinados pontos da amostra e a tensão normal na superfície ou próxima da superfície no interior do solo. Através desse ensaio, também são obtidas as curvas de deslocamento x força de arrancamento e um fator de interface (BUENO E VILAR, 2015).

Segundo Ferreira (2007), o que influencia nos resultados desse tipo de ensaio são as condições de contorno entre as quais se destacam: confinamento aplicado, tipo de solo, compactidade e grau de compactação, velocidade do ensaio, geometria da geogrelha, propriedades mecânicas e rugosidade da superfície do geossintético, além dos efeitos da geração de pressões neutras.

5.1.5.2 Ensaio de cisalhamento direto

Nos ensaios de cisalhamento direto convencionais é utilizado uma caixa de cisalhamento e adicionado o geossintético entre as duas metades da caixa. A resistência é provocada pelo deslizamento de uma das metades da caixa em relação ao geossintético. A parte inferior da caixa deve ser preenchida com solo, ou em alguns casos, pode compor um suporte rígido (SIEIRA, 2006).

Os ensaios de cisalhamento direto não apresentam grande dificuldade ao serem interpretados. Porém, os seus resultados podem ser influenciados por fatores como: posição relativa solo-geossintético, dimensões do equipamento, espessura da camada de solo, rugosidade do plano rígido e métodos para o controle da tensão vertical (AGUIAR, 2003).

5.2 VANTAGENS NO USO DE GEOSSINTÉTICOS EM BASES

De acordo com o GMA White Paper (2000), a *Federal Highway Administration* (FHWA) apresenta várias vantagens ao se utilizar reforço geossintético em base de pavimentos, como:

- reduzir a intensidade de tensões no subleito e prevenir a base de agregado penetrar no subleito;
- inibir a contaminação por finos oriundos do subleito ou de outra forma de migrarem para dentro da base;
- propiciar um aumento na resistência do subleito ao longo do tempo e restringir o deslocamento lateral do agregado;

- reduzir os recalques diferenciais da rodovia, auxiliando na manutenção da integridade e uniformidade do pavimento, também auxiliam na redução de recalques diferenciais em áreas de transição entre o corte e aterro;
- fornecer uma barreira capilar afim de reduzir a ação da água em solos propícios a degelo, além de poder tornar-se uma membrana que envolva camadas de solo, reduzindo os efeitos de mudanças sazonais de umidade em rodovias assentes em argila expansíveis;
- prevenir a contaminação do material de base, podendo assim permitir graduações mais abertas, com agregados mais drenantes;
- reduzir a profundidade da escavação requerida para se estabilizar o subleito;
- reduzir a perturbação do subleito durante a sua fase de construção;
- reduzir o número de manutenções e aumentar a vida útil do pavimento.

Com base em pesquisas e experiências brasileiras sobre os geotêxteis e as geogrelhas, Trinchês et al. (2015) afirmam que:

- as geogrelhas são mais eficientes na redução de trilha de rodas em pavimentos flexíveis, quando comparadas aos geotêxteis;
- existe um intervalo de espessura ótima da camada de base para a instalação de geogrelhas, onde se situa entre 15 e 25 cm. Em espessuras de base maiores que 30 cm, a eficiência é insignificante. Nessa condição, as geogrelhas devem ser inseridas no interior da camada de base;
- o uso de reforços para a redução de trilhas de rodas em estruturas é eficaz em pavimentos com número estrutural variando de 2,5 a 3,0 de acordo com a AASHTO, construídos sobre subleitos fracos, com CBR menores ou iguais a 3%;
- estruturas de pavimentos reforçadas com geogrelhas apresentam um aumento em sua vida útil ou projeto em torno de duas a quatro vezes;
- a principal função de um geotêxtil dentro de uma estrutura é a separação de materiais, podendo atuar também como camada filtrante;
- as geogrelhas também podem atuar como elementos separadores de camadas, porém podem obter menos eficiência quando comparadas aos geotêxteis.

6 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO UTILIZANDO GEOSINTÉTICO COMO REFORÇO DE BASE

Ao se construir um pavimento flexível, é necessário que o solo do subleito do pavimento possua uma determinada capacidade de suporte, evitando o aparecimento de profundas trilhas de roda causadas pelas cargas associadas ao tráfego.

O dimensionamento do reforço de rodovias não pavimentadas tem como base o efeito da membrana tracionada. Ao ocorrer a deformação vertical do subleito surge uma reação vertical do reforço, deformando no seu sentido de tracionamento para resistir aos esforços presentes do topo do pavimento como pode ser observado na Figura 11.

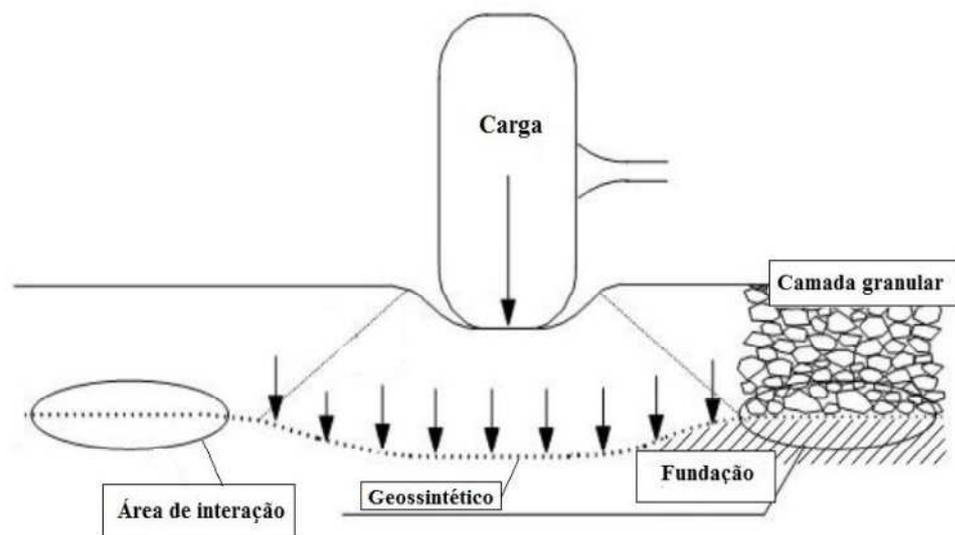


Figura 12 – Modelo de dimensionamento de reforço de uma rodovia não pavimentada. (Adaptado de ELIAS, 2004)

Nas rodovias pavimentadas, além do mecanismo do efeito da membrana tracionada usa-se para o dimensionamento do reforço o mecanismo do aumento da capacidade de suporte. Ele admite que o geossintético absorve grande parcela das tensões de cisalhamento devido o tráfego fazendo com que ela seja distribuída e reduzindo as tensões e deformações que chegariam até o subleito. Dessa forma, quanto mais rígido o geossintético for, mais eficiente será no reforço da camada de base como pode ser observado na Figura 12.

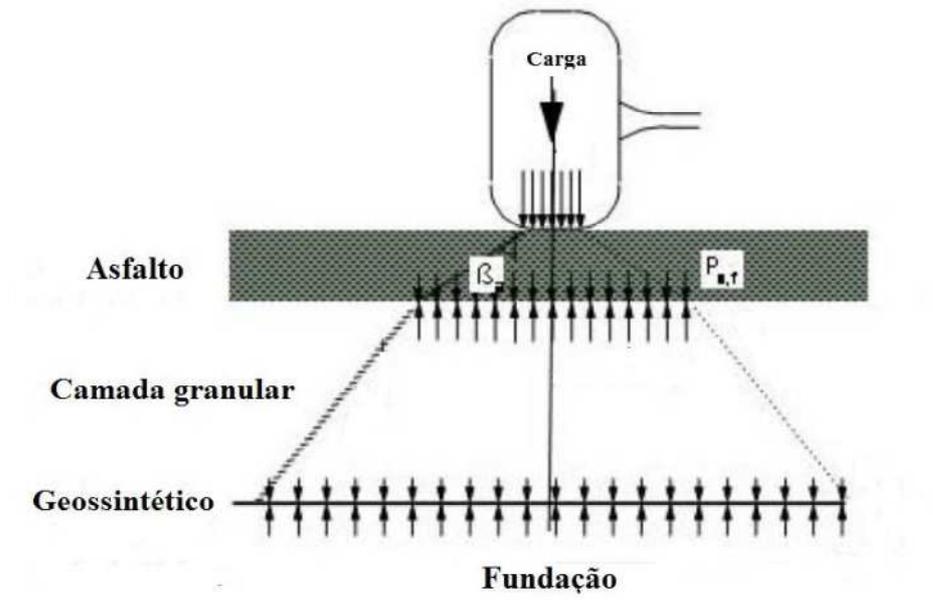


Figura 13 – Modelo de dimensionamento de reforço de uma rodovia pavimentada. (Adaptado de ELIAS, 2004)

6.1 ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DO GEOSSINTÉTICO DE REFORÇO

Em diversos estudos realizados, o principal indicador que quantifica a eficiência do geossintético quando incluso como reforço do pavimento é taxa de benefício de tráfego, TBR (*Traffic Benefit Ratio*) definida por:

$$TBR = \frac{N_{geo}}{N} \quad (6.1)$$

onde:

N_{geo} – Número de ciclos de carga suportada em um pavimento reforçado;

N – Número de ciclos de carga suportada em um pavimento não reforçado.

Buscando a redução dos custos iniciais de obra, é utilizado o índice de redução da espessura da camada de base, BCR (*Base Course Reduction*), é relacionada a espessura reduzida da camada de base com reforço, com a espessura da camada de base sem reforço, para o mesmo número de passagens do eixo padrão, definido por:

$$BCR = \frac{T_R}{T_v} \quad (6.2)$$

onde:

T_R – Espessura reduzida da camada de base reforçada;

T_v – Espessura da camada de base sem reforço.

Segundo Trinchês et al. (2015), normalmente é adotado um valor entre 20 – 25 mm para apontar a falha da estrutura do pavimento. Caso haja pavimentos de rodovias ou vias de tráfego pesado, geralmente admite-se 12,5 mm de limites de afundamentos. Para rodovias concessionadas, admite-se no Brasil afundamentos em trilha de roda de no máximo 7 mm.

6.2 RODOVIAS NÃO PAVIMENTADAS

De modo a inserir o uso de reforços geossintéticos em metodologias de dimensionamento de rodovias não pavimentadas e pavimentadas, diversos procedimentos vêm sendo utilizados para dimensionar a espessura da camada de revestimento primário.

Um método bastante utilizado em dimensionamento de espessura de camada de revestimento primário de rodovias não pavimentadas, considerando a vida de serviço da estrutura foi desenvolvido por Giroud e Han (2004) e pode ser observado na equação a seguir:

$$h = \frac{0,868 + (0,661 - 1,006J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1,5} \log N}{1 + 0,204(R_E - 1)} \times \left\{ \left(\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\left(\frac{s}{sf}\right) \left[1 - 0,9e^{-\left(\frac{r}{h}\right)^2}\right] N_c f_c} \right) \right\} \quad (6.3)$$

onde:

h – espessura da base granular requerida (m);

J – módulo de estabilidade de abertura da geogrelha (m-N/grau);

N – número de repetições do eixo padrão (AASHTO);

P – carga de roda (Kn);

R – raio da área de contato da roda equivalente (m);

$R_E = 3,48 \text{ CBR}_{\text{base}}^{0,3} / \text{CBR}_{\text{sub}}$ (CBR_{base} = CBR da base; CBR_{sub} = CBR do subleito);

s – profundidade máxima permitida da trilha de roda (mm);

f_s – o fator igual a 30 kPa;

$N_c = 3,14$ e $J = 0$ para bases não reforçadas;

$N_c = 5,14$ e $J = 0$ para reforços da base granular com geotêxtil;

$N_c = 5,71$ e $J = 0,32$ m-N/grau ou $J = 0,65$ m-N/grau para reforços de base granular com geogrelhas, com J dependente do tipo de geogrelha.

De acordo com Trinchês et al. (2015), o método em questão apresenta algumas limitações:

- O módulo de estabilidade de abertura da grelha deve ser maior que zero e menor que 0,8 m-N/grau;
- As geogrelhas utilizadas para calibração possuem módulo de 0,32 m-N/grau e 0,65 m-N/grau;
- Caso seja utilizado uma geogrelha com módulo de estabilidade superior a 0,8 m-N/grau, deve-se realizar ensaios laboratoriais em conjunto com uma calibração adequada;
- Deve-se admitir que o subleito é saturado e de baixa permeabilidade, com composição siltosa ou argilosa;
- Recomenda-se uma camada de base com espessura mínima de 100 mm.

6.3 RODOVIAS PAVIMENTADAS

Vários métodos de dimensionamento de estruturas de rodovias pavimentadas com geossintéticos são encontrados nas literaturas, um dos métodos mais utilizados é o dimensionamento de pavimentos flexíveis indicado pelo Guia da AASHTO (1993), onde a vida de serviço do pavimento é definida quando a ruptura excede o máximo afundamento de roda permitido, usualmente 75 mm. Ele considera o pavimento como um sistema elástico

multicamadas com um número estrutural (SN), refletindo a espessura total do pavimento e sua resiliência à carga do tráfego repetido.

O método da AASHTO (1993) utiliza de equações empíricas desenvolvidas de acordo com resultados de monitoramentos de tráfego em uma pista experimental da AASHTO Road Test em Ottawa, Illinois, no início de 1960.

Devido a formulação do método de dimensionamento da AASHTO (1993) surgiu o conceito de serventia (PSI - *Present Serviceability Index*), que é provocado principalmente pelas solicitações do tráfego no período de projeto. A curva típica de perda de serventia (PSI) ao longo do tempo de operação do pavimento pode ser observada na Figura 13.

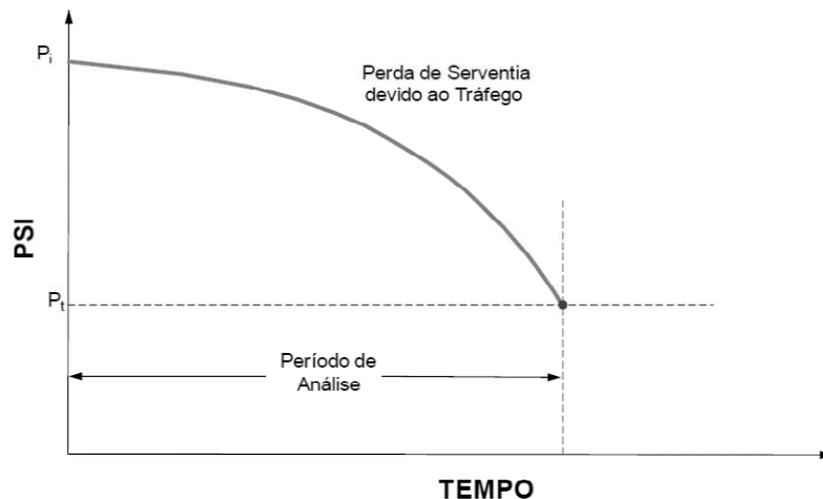


Figura 14 - Curva típica de perda de serventia (PSI). (Adaptado de AASHTO, 1993)

O número estrutural (SN) é dado pela equação (4.4) onde relaciona o tráfego, serventia e as espessuras de camadas, descrevendo o desempenho do pavimento no tempo.

$$9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN + 1)^{5,19}}} - \log W_{18} + 2,32 \log(M_R) \quad (6.4)$$

$$+ Z_R S_0 - 8,07 = 0$$

onde:

ΔPSI – perda de serventia esperada durante o período de projeto (entre 1,7 – 2,2);

W_{18} – número de solicitações do eixo padrão de 82 kN ou número N;

M_R – módulo de resiliência do subleito (psi);

Z_R – desvio padrão para a probabilidade de êxito que se quer para a estrutura dimensionada;

S_0 – desvio padrão que leva em conta as incertezas das variáveis medidas e do processo construtivo;

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

Como os valores de entrada são médios se faz necessário incluir um grau de incerteza no projeto, devendo-se assegurar com certa probabilidade que a serventia será a desejada durante a vida de projeto sobre quaisquer que sejam as condições ambientais e de tráfego. As Tabelas 1 e 2 apresentam os níveis de confiabilidade e desvio padrão normal recomendados de acordo com o tipo de projeto. Para o desvio padrão S_0 , é recomendado pelo manual da AASHTO (1993) o valor de 0,35 para pavimentos flexíveis e 0,45 para pavimentos rígidos.

Tabela 1 – Níveis de confiabilidade recomendados. (Adaptado de AASHTO, 1993)

CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL	Nível recomendado de confiabilidade	
	Urbanas	Rurais
Freeways	85 – 99,9	80 – 99,9
Artérias principais	80 – 90	75 – 95
Coletoras	80 – 95	75 – 95
Vicinais	50 - 80	50 - 80

Tabela 2 – Nível de confiabilidade e valor de Z_R. (Adaptado de AASHTO, 1993)

Confiabilidade R (%)	Z _R
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Após encontrar o número estrutural global, pode-se determinar a espessura das camadas individuais através de uma série de iterações, através da equação:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (6.5)$$

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 .

Os coeficientes estruturais das camadas do pavimento são dados pelas equações:

- Revestimento de concreto asfáltico (a_1):

$$a_1 = \frac{E_{ca}}{1,43E_{ca} + 27.200}$$

onde:

E_{ca} – módulo de elasticidade do concreto asfáltico.

- Camada de base (a_2):

$$a_2 = 0,249 \log E_b - 0,977$$

onde:

E_b – módulo de elasticidade da camada de base.

- Camada de sub-base (a_3):

$$a_3 = 0,227 \log E_{sb} - 0,839$$

onde:

E_{sb} – módulo de elasticidade médio da camada de sub-base.

O coeficiente de drenagem do material da camada só é considerado na base e sub-base do pavimento. Este coeficiente é tanto menor quanto melhor for a qualidade da drenagem, e quanto menor for o tempo que o pavimento ficará exposto à umidade próxima à de saturação, em correlação com a precipitação anual (MOTTA, 1991). A Tabela 3 apresenta os valores de m_i segundo o manual da AASHTO (1993).

Tabela 3 – Valores de m_i . (Adaptado de AASHTO, 1993)

QUALIDADE DE DRENAGEM	PERCENTAGEM DO TEMPO EM QUE A ESTRUTURA DO PAVIMENTO É EXPOSTA À SATURAÇÃO			
	Menos que 1%	1 – 5%	5 – 25%	Mais que 25%
Excelente	1,4 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Boa	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Regular	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muito pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

As Figuras 14 e 15 apresentam as posições das camadas do pavimento e seus respectivos números estruturais, bem como as inequações relacionadas às análises pertinentes respectivamente.

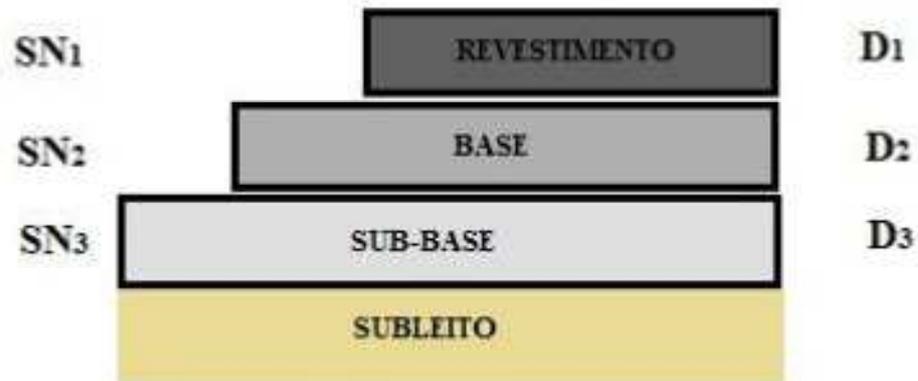


Figura 15 – Distribuição das camadas do pavimento. (Adaptado de AASHTO, 1993)

$$\begin{aligned}
 D_1^* &\geq \frac{SN_1}{a_1}; \\
 SN_1^* &= a_1 D_1^* \geq SN_1; \\
 D_2^* &\geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}; \\
 SN_1^* + SN_2^* &\geq SN_2, e \\
 D_3^* &\geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}.
 \end{aligned}$$

Figura 15 – Procedimento para determinação de espessuras de camadas de pavimento. (Adaptado de AASHTO, 1993)

Podendo ser alterado de acordo com a posição da camada na estrutura, sua condição de compactação e conforme outros materiais presentes, o coeficiente estrutural pode ser considerado um elemento mais flexível de avaliação, variando de 0,06 à 0,14 para a_2 e a_3 . (MOTTA, 1991).

Adaptações foram feitas nessa equação buscando representar o benefício encontrado pela adição do geossintético no comportamento do pavimento. Para contemplar o aumento da

vida ou período de projeto proporcionado pela geogrelha utiliza-se a TBR, onde será substituído o W_{18} pelo fator $W_{18 REF}$ encontrado por:

$$W_{18 REF} = TBR \times W_{18} \quad (6.6)$$

Portanto, adaptando a formulação tem-se:

$$9,36 \log_{10}(SN_{BR} + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN_{BR} + 1)^{5,19}}} - \log_{10} \frac{W_{18 REF}}{TBR} + 2,32 \log(M_R) + \quad (6.7)$$

$$Z_R S_0 - 8,07 = 0$$

onde:

TBR – taxa de benefício de tráfego;

SN_{BR} – número estrutural considerando a contribuição da geogrelha.

Usualmente adota-se para a TBR um valor de 2. Caso o pavimento seja submetido a ação de cargas especiais (alto peso), é recomendado uma análise de tensão/deformação através de programas computacionais apropriados.

É importante que as espessuras obtidas respeitem as espessuras mínimas para cada camada do pavimento apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Espessuras mínimas recomendadas para cada camada do pavimento. (Adaptado de AASHTO, 1993)

TRÁFEGO EIXOS EQUIVALENTES	CONCRETO ASFÁLTICO	BASE DO AGREGADO
Menor que 5×10^4	2,54 cm	10,16 cm
$5 \times 10^4 - 1,5 \times 10^5$	5,08 cm	10,16 cm
$1,5 \times 10^5 - 5 \times 10^5$	6,35 cm	10,16 cm
$5 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	7,62 cm	15,24 cm
$2 \times 10^6 - 7 \times 10^6$	8,89 cm	15,24 cm
Maior que 7×10^6	10,16 cm	15,24 cm

No Brasil, usualmente se aplica o método do DNER (DNIT, 2006), para o dimensionamento estrutural dos pavimentos flexíveis, onde não se consideram as deformações máximas de tração provocadas pelas cargas de tráfego e não há aspectos de serventia e desempenho do pavimento. Este método não pode ser utilizado para o dimensionamento do pavimento reforçado com geossintético, pois não é possível inserir o comportamento de uma camada reforçada a menos que sejam realizados estudos empíricos para a adaptação do método atual.

Segundo Santos (2011), após simulações feitas no software Monte Carlo verificou-se que a equação de dimensionamento do DNIT (2006) não é satisfatória em tráfegos pesados e valores de CBR elevados. A análise de sensibilidade apresentou que para as necessidades de aumento na estrutura apontadas para solicitações de tráfego são relativamente pequenas, sendo esta equação inadequada para estes níveis de tráfego.

6.4 EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO SEM REFORÇO (ADAPTADO DE TRICHÊS *ET AL.* 2015)

Dimensionar um pavimento pelo método da AASHTO (1993) considerando os seguintes parâmetros:

- $W_{18} = 3 \times 10^8$;
- Rodovia coletora urbana, confiabilidade = 90%;
- Rodovia coletora urbana, nível de serventia inicial = 4,2;
- Módulo de resiliência do subleito = 6000 psi;
- Módulo de resiliência da base = 42.850 psi;
- Módulo de resiliência sub-base = 21.400 psi;
- Módulo de resiliência do revestimento = 33.000 kgf/cm²;
- Desvio padrão: 0,35;
- Considera-se que em menos de 5% do tempo o pavimento será exposto a níveis de umidade próximos a saturação e que as camadas de base e sub-base granulares tem uma boa qualidade de drenagem, logo $m_i = 1,15$.

I. Nível de confiança (R)

Como o nível de confiabilidade varia de 80 a 95%, foi adotado um valor de 90% que está entre a média e através da Tabela 2 obteve-se o valor de Z_R , logo:

$$Z_R \times S_0 = (-1,282) \times 0,35$$

$$R = -0,4487$$

II. Índice de serventia final

A serventia de um pavimento é definida como a sua capacidade de servir ao tráfego. Normalmente adota-se uma serventia final do pavimento para rodovia coletor urbana no valor de 2, logo:

$$\Delta\text{PSI} = 4,2 - 2$$

$$\Delta\text{PSI} = 2,2$$

III. Módulo de resiliência (M_R)

O módulo de resiliência varia de acordo com o material utilizado em cada camada do pavimento. Recomenda-se realizar ensaios laboratoriais de resiliência dos materiais para a determinação dos seus comportamentos.

IV. Coeficientes estruturais das camadas do pavimento

- Revestimento de concreto asfáltico (a_1)

$$a_1 = \frac{33.000}{1,43(33.000) + 27.200} = 0,44$$

- Camada de base (a_2)

$$a_2 = 0,249[\log(42.850)] - 0,977 = 0,176$$

- Camada de sub-base (a_3):

$$a_3 = 0,227[\log(21.400)] - 0,839 = 0,144$$

V. Equação indicada pela AASHTO (1993)

$$9,36 \log_{10}(SN_{BR} + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left[\frac{2,2}{4,2-1,5}\right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN_{BR}+1)^{5,19}}} - \log_{10}(3 \times 10^8) +$$

$$2,32 \log(42.850) + (-0,5769) - 8,07 = 0$$

Substituindo os valores apresentados no projeto na equação (6.4), obteve-se um valor aproximadamente de $SN_1 = 4,06$

Portanto, para a espessura do revestimento tem-se:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{4,06}{0,44} = 9,23'' \quad (= 23,44 \text{ cm})$$

O mesmo procedimento utilizado para encontrar SN_1 através da equação (6.7) foi feito para encontrar SN_2 e SN_3 , então:

$$SN_2 = 5,07$$

$$SN_3 = 7,40$$

Portanto para a espessura da camada de base tem-se:

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 m_2} = \frac{5,07 - 4,06}{0,176 \times 1,15} = 4,99'' \quad (= 12,67 \text{ cm})$$

Como a espessura calculada da base foi abaixo da espessura mínima recomendada de 6'', o SN_2 deve ser recalculado e encontrar a nova espessura da base.

$$SN_2 = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 = (0,44 \times 9,23) + (0,176 \times 1,15 \times 6)$$

$$SN_2 = 5,28$$

Para camada de sub-base tem-se:

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 m_3} = \frac{7,40 - 5,28}{(0,144 \times 1,15)} = 12,8'' \quad (= 32,5 \text{ cm})$$

VI. Espessura do revestimento

A estrutura final do pavimento será constituída por:

- Revestimento: 23,44 cm de concreto asfáltico usinado a quente, com módulo de elasticidade 33.000 kgf/cm²;
- Base: 15,24 cm de espessura em brita graduada, com módulo de elasticidade médio de 42.850 psi;
- Sub-base: 32,5 cm de espessura em macadame seco, com módulo de elasticidade médio de 21.400 psi.

6.5 EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE PAVIMENTO COM REFORÇO (ADAPTADO DE TRICHÊS *ET AL.* 2015)

Para efeito comparativo, considerou-se os dados utilizado no dimensionamento do exemplo 6.4.

VII. Nível de confiança (R)

Como o nível de confiabilidade varia de 80 a 95%, foi adotado um valor de 90% que está entre a média e através da Tabela 2 obteve-se o valor de Z_R , logo:

$$Z_R \times S_0 = (-1,282) \times 0,35$$

$$R = -0,4487$$

VIII. Índice de serventia final

A serventia de um pavimento é definida como a sua capacidade de servir ao tráfego. Normalmente adota-se uma serventia final do pavimento para rodovia coletor urbana no valor de 2, logo:

$$\Delta PSI = 4,2 - 2$$

$$\Delta PSI = 2,2$$

IX. Módulo de resiliência (M_R)

O módulo de resiliência varia de acordo com o material utilizado em cada camada do pavimento. Recomenda-se realizar ensaios laboratoriais de resiliência dos materiais para a determinação dos seus comportamentos.

X. Coeficientes estruturais das camadas do pavimento

- Revestimento de concreto asfáltico (a_1)

$$a_1 = \frac{33.000}{1,43(33.000) + 27.200} = 0,44$$

- Camada de base (a_2)

$$a_2 = 0,249[\log(42.850)] - 0,977 = 0,176$$

- Camada de sub-base (a_3):

$$a_3 = 0,227[\log(21.400)] - 0,839 = 0,144$$

XI. Equação indicada pela AASHTO (1993)

$$9,36 \log_{10}(SN_{BR} + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{2,2}{4,2-1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,094}{(SN_{BR}+1)^{5,19}}} - \log_{10} \frac{3 \times 10^6}{2} + 2,32 \log(42.850) + (-0,5769) - 8,07 = 0$$

Substituindo os valores apresentados no projeto na equação (6.7), obteve-se um valor aproximadamente de $SN_1 = 3,67$.

Portanto, para a espessura do revestimento tem-se:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{3,69}{0,44} = 8,34" \quad (\cong 21,19 \text{ cm})$$

O mesmo procedimento utilizado para encontrar SN_1 através da equação (6.7) foi feito para encontrar SN_2 e SN_3 , então:

$$SN_2 = 4,62$$

$$SN_3 = 6,78$$

Portanto para a espessura da camada de base tem-se:

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 m_2} = \frac{4,62 - 3,67}{0,176 \times 1,15} = 4,69'' (= 11,92 \text{ cm})$$

Como a espessura calculada da base foi abaixo da espessura mínima recomendada de 6'', o SN_2 deve ser recalculado e encontrar a nova espessura da base.

$$SN_2 = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 = (0,44 \times 8,34) + (0,176 \times 1,15 \times 6)$$

$$SN_2 = 4,88$$

Para camada de sub-base tem-se:

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 m_3} = \frac{6,78 - 4,88}{(0,144 \times 1,15)} = 11,47'' (= 29,14 \text{ cm})$$

XII. Espessura do revestimento

A estrutura final do pavimento será constituída por:

- Revestimento: 21,19 cm de concreto asfáltico usinado a quente, com módulo de elasticidade 33.000 kgf/cm²;
- Base: 15,24 cm de espessura em brita graduada, com módulo de elasticidade médio de 42.850 psi;
- Sub-base: 29,14 cm de espessura em macadame seco, com módulo de elasticidade médio de 21.400 psi.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos dimensionamentos, pôde-se observar a redução da espessura das camadas do pavimento, ocorrendo conseqüentemente a redução do material utilizado e gerando maior economia.

Tabela 5 - Espessuras encontradas no dimensionamento.

	Pavimento sem reforço	Pavimento com reforço
Revestimento	23,44	21,19
Base	15,24	15,24
Sub-base	32,5	29,14

7 CONCLUSÃO

A aplicação de geossintéticos em diversas obras da Engenharia Civil e geotécnicas vem crescendo continuamente devido sua versatilidade, podendo ser utilizado em diversas funções. Com a diversidade de solos encontrados hoje em dia, se faz necessário a busca por materiais que possibilitem melhorar a sua capacidade de suporte. O presente trabalho abordou a utilização de geossintéticos como elemento de reforço de base de pavimentos, apresentando vantagens como: aumento de vida útil das estruturas reforçadas, aumento na resistência do subleito, redução dos recalques diferenciais da rodovia, redução das espessuras das camadas, entre outros.

Para o dimensionamento do pavimento, como existe uma grande variedade de materiais deve-se estar atento a identificação de suas características, buscando sempre o melhor desempenho da estrutura. Foi possível analisar os parâmetros utilizados no reforço, bem como a diferença de espessura das camadas da estrutura reforçada e sem reforço. Pôde-se observar com o exemplo de dimensionamento que ocorreu uma redução do material das camadas obtendo como resultado: 2,25 cm e 3,36 cm a menos nas espessuras das camadas de revestimento e sub-base respectivamente. Portanto, com a inclusão do geossintético e de acordo com a extensão a ser pavimentada ocorrerá uma redução do material utilizado, gerando maior economia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Washington: American Association of State Highway and Transportatios Officials, 1993.

ABINT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃO-TECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS. **Curso Básico de Geotêxteis**. São Paulo, 2001.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318: Geossintéticos – Termos e definições**. ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

ADAMS, M. *et al.* **Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System Synthesis Report**. U.S. Department of Transportation, Federal Hihgway Administration, McLean, Virginia, 2011.

AGUIAR, V. R. **Ensaio de Rampa para Estudo da Resistência de Interfaces Solo-Geossintético**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

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

BASTOS, G. A. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis**. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Petrobras: ABEDA, Rio de Janeiro, 2006.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Propriedades, Ensaio e Normas. In. VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2015.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Relatório gerencial, Brasília, 2016.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

ELIAS, J. M. **Building Roadsmon Sabkha Soil with Geosynthetic Systems**. Abu Dhabi, 2004.

FERREIRA, A. Z. **Estudo de Reforço de Pavimentos com Ensaio de Arrancamento em Equipamentos de Pequenas Dimensões**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GIROUD, J. P.; HAN, J. **Application of the Giroud g Han design method for geosynthetic reinforced unpaved roads – Part I: theoretical development**. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004.

GMA WHITE PAPER. **Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures**. Geosynthetic Materials Association, 2000.

IGS –INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY. **Folhetos IGS**. 2015. Disponível em: <http://igsbrasil.org.br/biblioteca-virtual/page/2>. Acesso em: 12/09/2017.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13431: Geotextiles and geotextile-related products – Determination of tensile creep and dreep rupture behaviour**. 1998.

LOPES, M. P.; LOPES, M. L. **A Durabilidade dos Geossintéticos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PALMEIRA, E. M. **Solo Reforçado**. Huesker, São José dos Campos, 1999.

PAULA, A. M. V. **Danificação Durante a Instalação – Avaliação Laboratorial da Influência no Comportamento dos Geossintéticos**. Universidade do Porto, Porto, 2003.

SANTOS, C. R. G. **Dimensionamento e Análise do Ciclo de Vida de Pavimentos Rodoviários: Uma Abordagem Probabilística**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Projetos Rodoviários**. PINI, São Paulo, 1929.

SIEIRA, A. C. C. F. **Geossintéticos e Obras de Terra**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

TRICHÊS, G. *et al.* Reforço de Base de Pavimentos. In. VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2015.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2015.

ZORNBERG, J. G. **Geosynthetic-reinforced Pavement Systems**. Fifth European Geosynthetic Conference, Valencia, 2012.