

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Guilherme Souza Barbosa**

**PAVIMENTOS COM BASE REFORÇADA COM  
GEOGRELHA: ANÁLISE DE DESEMPENHO**

Porto Alegre  
julho 2010

**GUILHERME SOUZA BARBOSA**

**PAVIMENTOS COM BASE REFORÇADA COM  
GEOGRELHA: ANÁLISE DE RESULTADOS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti**

Porto Alegre  
julho 2010

**GUILHERME SOUZA BARBOSA**

**PAVIMENTOS COM BASE REFORÇADA COM  
GEOGRELHA: ANÁLISE DE DESEMPENHO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2010

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)**  
DSc, COPPE/UFRJ

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. em Engenharia Civil /UFRGS

**João Rodrigo Guerreiro Mattos**  
Mestre em Geotecnia / UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Claudionor e Nair Elisabeth, que sempre me apoiaram e foram os exemplos de dedicação e superação que me trouxeram até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti, orientador deste trabalho, pelas horas dedicadas e pelo envolvimento com este trabalho.

Agradeço ao Prof. Washington Peres Núñez pela colaboração e apoio na elaboração deste trabalho.

Agradeço à equipe da empresa Pires SS pelo apoio e pelos caminhos abertos.

Agradeço à minha família pelo apoio nas horas difíceis e pela educação que me permitiu crescer profissionalmente e pessoalmente.

Agradeço à Josiane pela compreensão e apoio em momentos críticos deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos pelos momentos de descontração em meio à correria da vida de estudante.

Não tentes ser bem sucedido, tenta antes ser um homem de valor.

*Albert Einstein*

## RESUMO

BARBOSA, G. S. **Pavimentos com Base Reforçada com Geogrelha**: análise de desempenho. 2010. 43 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho visa a análise do desempenho teórico e real de pavimentos com reforço de geogrelha na base. Esse método de reforço surgiu a partir da necessidade de criação de alternativas de projeto de pavimentação frente a antigos conceitos que eram aplicados, uma vez que os mesmos muitas vezes não supriam as necessidades enfrentadas. Para a elaboração desse estudo, a revisão bibliográfica baseou-se na busca de dados de trechos experimentais construídos e instrumentados, cujo pavimento teve sua base reforçada com geogrelha. Também serviram de base definições e modelagens teóricas de comportamento e interações com as camadas granulares, além de critérios e métodos de dimensionamento para esse tipo de estrutura. Conforme pesquisado, observou-se que a geogrelha pode exercer diversas funções dentro de uma estrutura de pavimento, porém a mais comum delas é a de reforço. Para tanto, esse geossintético atua suportando tensões de tração existentes nas partes inferiores das estruturas, criando uma espécie de confinamento à base. Com isso o módulo de resiliência da camada é elevado, o que além de evitar deformações horizontais e conseqüentemente verticais, e também ocasionar uma melhor distribuição de tensões no subleito, favorecendo os aspectos técnicos da estrutura. Para o cálculo de dimensionamento de pavimentos com base reforçada com geogrelha, têm sido recomendada uma adaptação da formulação proposta pela AASHTO (1993), que se utiliza da TBR, além dos métodos bastante conhecidos propostos por Milligan et al. (1989), e por Giroud e Han (2003). Resultados provenientes do trecho experimental existente entre Itabira e Senhora do Carmo/MG também são apresentados neste trabalho. Na análise de desempenho teórico, foi utilizado o método adaptado da AASHTO (1993) para o dimensionamento de uma estrutura particular, e se observou a variação das espessuras conforme variações do TBR. Assim, se destacou no trabalho o pequeno ganho de desempenho que o pavimento obteve com a inserção de geogrelha no caso prático e a economia de material granular obtida através do dimensionamento do pavimento com o reforço no caso teórico.

Palavras-chave: geogrelha; análise de desempenho; base de pavimento; reforço.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama das etapas do trabalho .....	15
Figura 2: benefícios gerados pela presença de um geossintético: (a) o geotêxtil atuando como elemento separador e filtrante de camadas de base; (b) a geogrelha atuando como elemento de reforço e confinante de base .....	17
Figura 3: diferentes formatos de geogrelha .....	18
Figura 4: proposta de transferência de tensões cisalhantes na interface base-reforço .....	19
Figura 5: esquema da interação do reforço com o material de base .....	20
Figura 6: demonstração do efeito de intertravamento com um carro apoiado em uma coluna de cascalho reforçada com geogrelhas soldadas .....	21
Figura 7: aumento da área de distribuição de tensões no subleito diminuindo as espessuras das camadas .....	23
Figura 8: camadas da estrutura da seção 06 – base de mistura e geogrelha entre base e sub-base .....	31
Figura 9: área de contato entre os pneus e o pavimento .....	32
Figura 10: camadas da estrutura da seção 02 – base de mistura sem geogrelha entre base e sub-base .....	33
Figura 11: camadas da estrutura do pavimento dimensionado .....	39
Figura 12: relação entre espessura da camada de sub-base e TBR .....	40



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: tipos de geossintéticos e suas principais funções .....	17
Quadro 2: dados de campo das deflexões medidas com viga Benkelman da seção 6 .....	33
Quadro 3: dados de campo das deflexões medidas com viga Benkelman da seção 2 .....	33
Quadro 4: leituras de campo – deflexões em 0,01 mm e raios em metros da seção 6 .....	34
Quadro 5: leituras de campo – deflexões em 0,01 mm e raios em metros da seção 2 .....	34
Quadro 6: dados de projeto para estrutura a ser dimensionada .....	37
Quadro 7: valores dos coeficientes estruturais para estrutura a ser analisada .....	37
Quadro 8: valores de números estruturais para cada valor de TBR analisado .....	38
Quadro 9: Espessuras da camada de sub-base para cada valor de TBR analisado .....	39

## **LISTA DE SIGLAS**

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

CBR: *California Bearing Ratio*

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

IGS: *International Geosynthetics Society*

MG: Minas Gerais

TBR: *Traffic Benefit Ratio*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>13</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	13
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	13
<b>2.2.1 Objetivo principal .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2 Objetivos secundários .....</b>	<b>13</b>
2.3 PRESSUPOSTO .....	13
2.4 DELIMITAÇÕES .....	14
2.5 LIMITAÇÕES .....	14
2.6 DELINEAMENTO .....	14
<b>3 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL .....</b>	<b>16</b>
3.1 DEFINIÇÃO DE GEOSSINTÉTICO .....	16
3.2 DEFINIÇÃO DE GEOGRELHA .....	18
3.3 MECANISMOS DE AÇÃO DA GEOGRELHA COMO REFORÇO DE BASE ....	19
<b>4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM BASE REFORÇADA COM GEOGRELHA .....</b>	<b>24</b>
4.1 MÉTODO PROPOSTO POR MILLIGAN E OUTROS (1989) .....	24
4.2 MÉTODO DE GIROUD E HAN (2003) .....	27
4.3 MÉTODO ADAPTADO DA AASHTO (1993) .....	28
<b>5 DADOS DE TRECHO EXPERIMENTAL – RODOVIA ENTRE ITABIRA E SENHORA DO CARMO / MG .....</b>	<b>30</b>
<b>6 ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO .....</b>	<b>36</b>
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>41</b>
REFERÊNCIAS .....	43



## 1 INTRODUÇÃO

Vias em más condições de circulação geram gastos elevados para um país, grande parte em virtude do aumento de consumo de combustíveis, dos custos de manutenção da frota e dos acidentes, em um ciclo que afeta toda a sociedade. Dentre as patologias mais comumente encontradas nas estruturas, estão os afundamentos de trilha de roda e trincamentos por fadiga do revestimento asfáltico.

Trichês e Bernucci (2004, p. 153) argumentam que:

Quando pavimentos flexíveis são assentados sobre subleitos de baixa capacidade de suporte, as causas mais frequentes dos problemas relatados acima são:

a) redução da espessura e da resistência da camada granular pela cravação ou agulhamento do material granular no subleito. Isso decorre da repetição de solicitação de tráfego, que também promove, em presença de água, ascensão do solo plástico para vazios da camada granular por bombeamento;

b) heterogeneidade do estado da camada granular. Decorre de problemas nos serviços de compactação da camada granular, devido à 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. Associa-se a isso o fato de solos de baixa capacidade oferecerem baixa resistência ao deslocamento lateral dos agregados. Tem-se, então, que o fundo ou parcela inferior da camada irá trabalhar com menores valores de módulo de resiliência.

Na tentativa de melhorar as condições de rolagem das pistas, diversos métodos têm sido aplicados alterando e reforçando de diferentes formas tanto camadas de revestimento, quanto, também, as de base. Um desses métodos trata do reforço da camada de base com geogrelha, estrutura geossintética em forma de grelha, de malha quadrada ou retangular, com elevada resistência à tração, que age principalmente absorvendo esforços de tração existentes nas partes inferiores das camadas. A sua utilização serve para evitar o surgimento e propagação de trincas, além de também poder, sob determinadas condições, atuar na separação da camada granular do subleito.

Pesquisas nessa área se justificam por representarem possibilidade de economia para construtoras e poder público, através de projetos mais precisos e adequados à realidade local. Além disso, a possível redução de espessura de camadas granulares tem ainda um apelo ecológico, pois diminuirá a exploração de jazidas, protegendo o meio ambiente.

O foco desse estudo é a análise do desempenho obtido por estruturas de pavimento com base reforçada com geogrelha, construídas e devidamente instrumentadas, e dos resultados de dimensionamento de um pavimento reforçado específico de acordo com o método definido.

O trabalho se desenvolveu organizado por capítulos, de forma a estabelecer uma linha de raciocínio sobre o tema. Assim, após essa breve **Introdução**, o capítulo 2 trata dos **Métodos de Pesquisa**, no qual foram abordados aspectos técnicos que guiaram os procedimentos em geral na execução deste trabalho.

No capítulo 3, **Características do Material**, encontram-se informações gerais sobre geossintéticos e, em especial, sobre o comportamento da geogrelha. O capítulo 4, **Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Reforçados com Geogrelha**, traz a descrição de três métodos de reforço, considerados os mais empregados, com explicações sobre a aplicabilidade dos mesmos.

O capítulo 5, **Dados de Trecho Experimental – Rodovia entre Itabira e Senhora do Carmo/MG**, aborda resultados obtidos pelo estudo conduzido por Sérgio Saraiva, em 2006. Tratando sobre seis seções-teste construídas e instrumentadas para esse estudo. No capítulo 6, **Conclusões**, é apresentado o resultado final da pesquisa e uma discussão sobre problemas encontrados, além de sugestão para estudos futuros.

## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual o ganho de desempenho de pavimentos cujas bases foram reforçadas com geogrelhas segundo métodos de dimensionamento e o ganho observado em estruturas instrumentadas?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho são análises desempenho teórico e real de estruturas de pavimentos com bases reforçadas com geogrelha.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários deste trabalho são as descrições do comportamento teórico e do desempenho das geogrelhas estudadas, bem como a definição do método de dimensionamento mais adequado para a análise teórica deste trabalho.

### **2.3 PRESSUPOSTO**

São pressupostos do trabalho que o desempenho das estruturas pode ser avaliado através dos valores obtidos de deflexão nos pavimentos estudados e que as deflexões apresentadas correspondem aos valores reais para estruturas semelhantes.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

A análise foi delimitada a estruturas de pavimentos cuja camada de base foi reforçada com geogrelha assentadas sobre solos de baixa capacidade de suporte.

## 2.5 LIMITAÇÕES

A pesquisa se limitou a análise de estruturas de pavimentos com base reforçada com geogrelha em trechos experimentais já construídos e instrumentados e a análises teóricas utilizando o apenas o método de dimensionamento definido para este trabalho.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho seguiu o seguinte delineamento:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) levantamento de dados de trechos experimentais;
- c) descrição do desempenho obtido pelas estruturas;
- d) avaliação do comportamento real dos pavimentos;
- e) estudo do comportamento teórico das geogrelhas;
- f) estudo de métodos de dimensionamento de reforço;
- g) avaliação de dimensionamento de estruturas reforçadas;
- h) análise final e conclusões.

O trabalho foi desenvolvido fundamentalmente sobre pesquisa bibliográfica, de modo que se obteve uma extensa base teórica a respeito do funcionamento e aplicabilidade das geogrelhas, através de livros, manuais e publicações científicas recentes. Juntamente a isso, também se buscou bases de dados de trechos experimentais conhecidos que foram instrumentados para verificação de desempenho de pavimentos com base reforçada com geogrelha.

Os dados obtidos de trechos experimentais formaram então uma base de dados que subsidiou um estudo do desempenho real da estrutura. Esse desempenho foi avaliado considerando as deflexões como parâmetro de comparação e utilizando dados de trechos equivalentes sem reforço



Ao mesmo tempo, foi feito um levantamento de métodos de dimensionamento de reforço disponíveis para reforço de base com geogrelha. Analisando os métodos levantados, foi definido qual método seria mais apropriado, para este trabalho, para ser aplicado em um problema típico.

Por fim, são apresentadas a análise final e as conclusões, onde fica explícito o resultado final da pesquisa. As etapas são representadas de forma esquemática na figura 1.

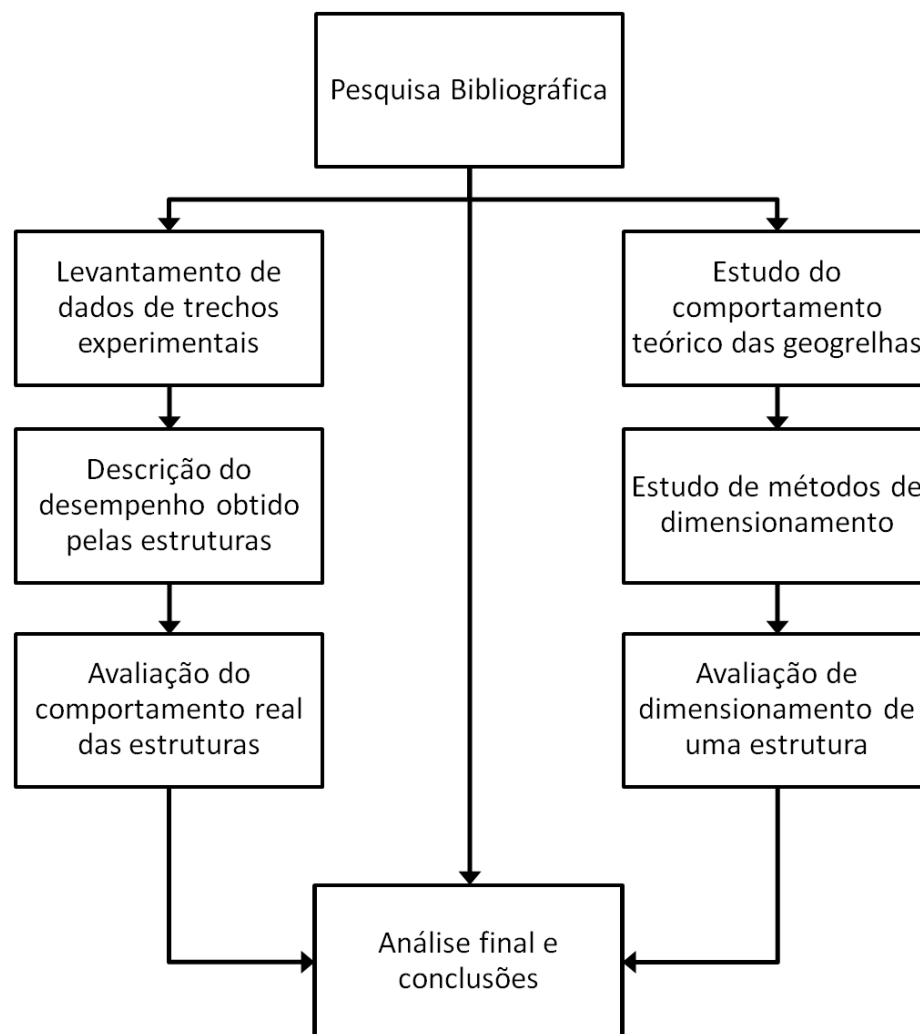


Figura 1: diagrama de etapas do trabalho

### 3 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL

Esse capítulo visa embasar de forma substancial o estudo sobre o desempenho de geogrelhas atuando como reforço de base de pavimentos. Para tanto, é necessária uma compreensão avançada sobre definições de geossintéticos em geral e de geogrelha, além de suas principais características e mecanismos.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DE GEOSSINTÉTICO

Segundo Aguiar e Vertematti (2004, p. 7):

[geossintético é um] produto polimérico (sintético ou natural) industrializado, desenvolvido para aplicação em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções, entre as quais destacam-se: reforço, filtração, drenagem, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial.

Ainda, Koerner<sup>1</sup> (1994 apud ANTUNES, 2008, p. 9) cita que geossintéticos podem ser caracterizados pela natureza do polímero utilizado, pelo arranjo entre as fibras e/ou filamentos, pela tecnologia de fabricação e ainda pelas suas possíveis aplicações geotécnicas. Diferentes tipos de geossintéticos e suas principais funções são apresentados no quadro 1 e um esquema apresentando os benefícios do uso de geossintéticos na figura 2.

Além disso, como qualquer produto manufaturado, os geossintéticos devem obedecer a um rigoroso controle no processo de fabricação, evitando que o produto chegue à obra com características inferiores às estabelecidas em projeto. Assim, antes de sua aplicação, diversos ensaios devem ser realizados para confirmação de suas características físicas, mecânicas, hidráulicas e de desempenho (BUENO; VILAR, 2004, p. 63).

---

<sup>1</sup> KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 3rd ed. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1994.

Tipo de Geossintético	Função Característica					
	Reforço	Separação	Drenagem	Filtração	Proteção	Barreira
Geotêxtil Tecido	X	X	X		X	
Geotêxtil Não-Tecido	X	X	X	X	X	
Geogrelha	X					
Georrede			X			
Geodrenos			X	X		
Geomembranas		X				X
Geocélulas	X				X	
Geocompostos	X		X	X	X	X

Quadro 1: tipos de geossintéticos e suas principais funções (ANTUNES, 2008, p. 9)

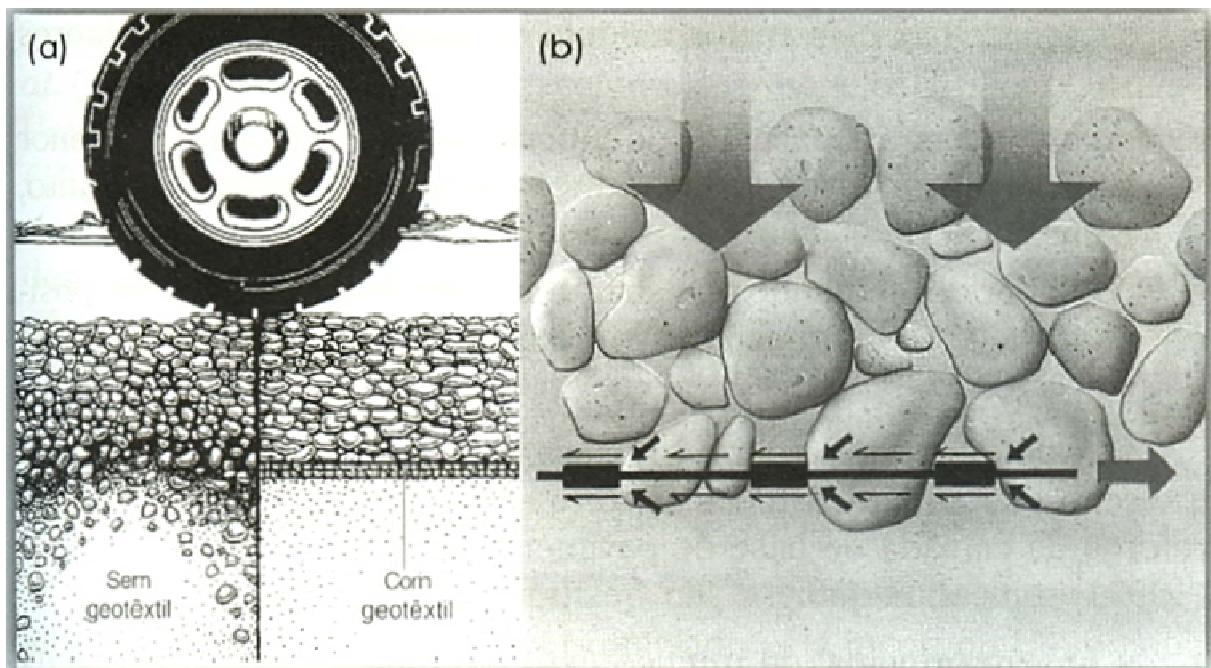


Figura 2: benefícios gerados pela presença de um geossintético: (a) o geotêxtil atuando como elemento separador e filtrante de camadas de base; (b) a geogrelha atuando como elemento de reforço e confinante de base (TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 155)

### 3.2 DEFINIÇÃO DE GEOGRELHA

Aguiar e Vertematti (2004, p. 9) também definem que:

[geogrelha é um] 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 em uma direção, e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas.

Geogrelhas também são caracterizadas como “[...] materiais planares flexíveis formados por uma rede regular de elementos com aberturas de tamanho suficiente para interagir com o material de enchimento circundante.” (KOERNER<sup>2</sup>, 1994 apud ANTUNES, 2008, p. 10). A figura 3 mostra variações de modelos de geogrelha segundo parâmetros de material, direcionalidade e processo de fabricação.

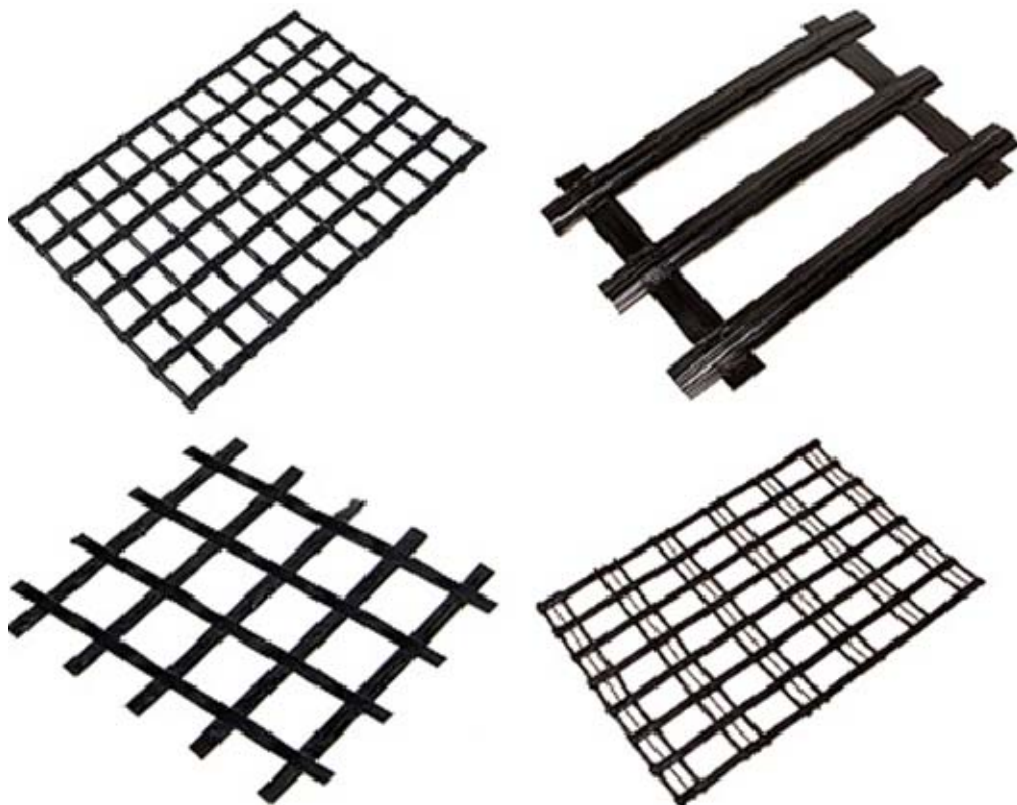


Figura 3: diferentes formatos de geogrelhas (MEDEIROS, 2008)

---

<sup>2</sup> KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 3rd ed. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1994.

### 3.3 MECANISMOS DE AÇÃO DA GEOGRELHA COMO REFORÇO DE BASE

A função de reforço é desenvolvida pela interação entre as camadas de solo e de geossintético contida no interior ou na parte inferior da camada granular de base e, basicamente, consiste de quatro mecanismos distintos (PERKINS<sup>3</sup>, 1999 apud ANTUNES, 2008, p. 13). O autor afirma também que o carregamento proveniente do veículo, aplicado à superfície do pavimento gera tensões laterais na base, logo abaixo do carregamento aplicado, conforme mostra a figura 4.

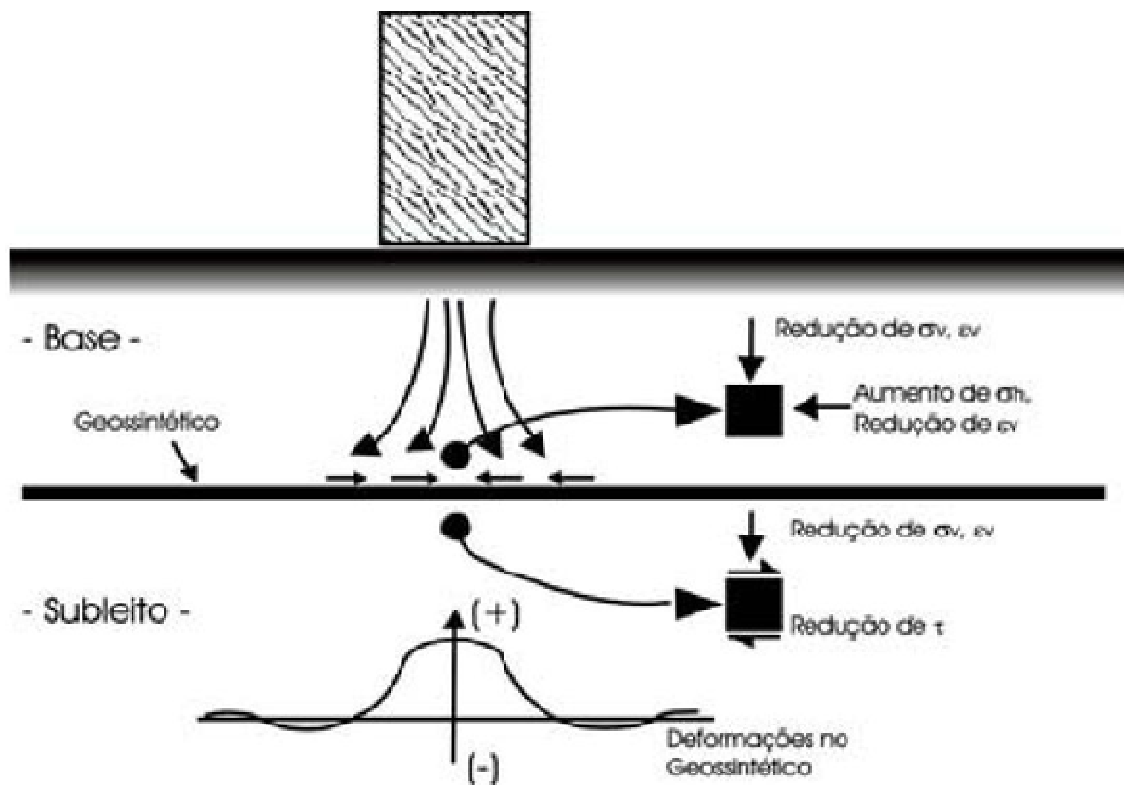


Figura 4: proposta de transferência de tensões de cisalhamento na interface base-reforço. (PERKINS<sup>4</sup>, 1999 apud ANTUNES, 2008, p. 13)

A introdução de material geossintético na camada de base permite uma interação cisalhante, que se desenvolve entre o agregado e o geossintético com a tentativa da base de se espalhar

<sup>3</sup> PERKINS, S. W. Mechanical Response of Geosynthetic-Reinforced Flexible Pavements. **Geosynthetics International**, London, v. 6, n. 5, p. 347-382, 1999.

<sup>4</sup> op. cit.

lateralmente (PERKINS<sup>5</sup>, 1999 apud ANTUNES, 2008, p. 14). Antunes (2008, p. 14) explica que:

O carregamento cisalhante é transmitido do agregado de base para o geossintético, que é então, tracionado. A rigidez relativamente alta do geossintético atua no retardamento do desenvolvimento de deformações laterais na base adjacente ao geossintético. Menores deformações laterais resultam em menores deformações verticais da superfície do pavimento. Assim, tem-se desta forma o primeiro mecanismo do reforço que corresponde à redução direta do espalhamento lateral da camada de base.

As figuras 5 e 6 ilustram o mecanismo citado acima.

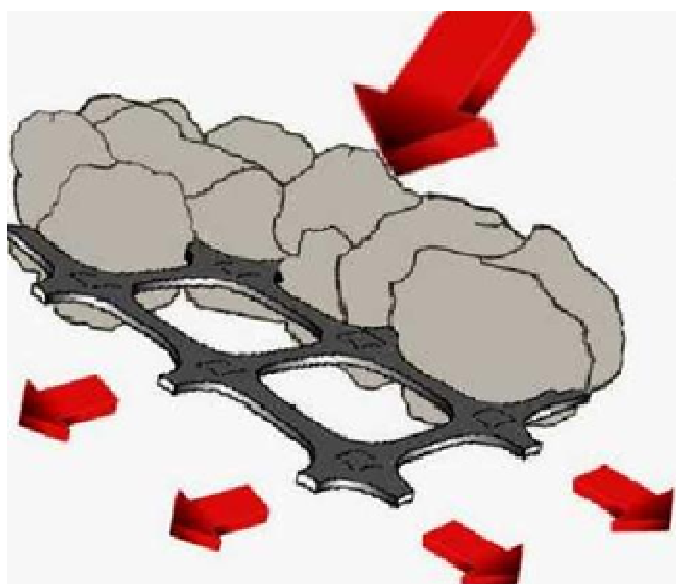


Figura 5: esquema da interação do reforço com o material de base. (ANTUNES, 2008, p. 14)

Maubeuge e Lesny (2008, p. 938) corroboram com as afirmações anteriores ao mencionar que geogrelhas funcionam com o intertravamento do material granular ou solo colocado sobre as mesmas. Assim, as aberturas permitem a passagem do material que cobre a geogrelha que então trava o material com as tiras (tecidos achatados/barras) provendo confinamento à camada superior pela rigidez e esforços nas tiras.

Segundo Trichês e Bernucci (2004, p. 159), “Uma vez que esse elemento é aplicado na região onde ocorrem as deformações máximas de tração, há tendência de que o tipo rígido conduza a um melhor desempenho no reforço da camada granular.” desde que adequadamente estendida.

---

<sup>5</sup> PERKINS, S. W. Mechanical Response of Geosynthetic-Reinforced Flexible Pavements. **Geosynthetics International**, London, v. 6, n. 5, p. 347-382, 1999.

Em contrapartida, tipos mais flexíveis de geossintéticos podem exigir uma deformação maior para atingir a tensão necessária pra seu ativamento, gerando assim patologias indesejáveis na superfície do pavimento.



Figura 6: demonstração do efeito de intertravamento com um carro apoiado em uma coluna de cascalho reforçada com geogrelhas soldadas. (MAUBEUGE; LESNY, 2008, p. 938)

O segundo mecanismo de reforço, de acordo com Perkins<sup>6</sup> (1999 apud ANTUNES, 2008, p. 14), Hass<sup>7</sup> et al. (1988 apud TANG et al., 2008, p. 973) e Love (1984, p. 185) é obtido através

<sup>6</sup> PERKINS, S. W. Mechanical Response of Geosynthetic-Reinforced Flexible Pavements. **Geosynthetics International**, London, v. 6, n. 5, p. 347-382, 1999.

<sup>7</sup> HASS, R.; WALL, J.; CARROLL, R. G. Geogrid Reinforcement of Granular Bases in Flexible Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Washington D. C., n. 1188, p. 19-27, 1988.

do aumento do confinamento lateral no interior da base, decorrente das tensões cisalhantes que se desenvolvem entre o material granular e a geogrelha. Graças ao aumento de confinamento, os materiais granulares da base têm seu módulo de elasticidade aumentado, resultando, finalmente, em um aumento de rigidez da camada de base. Esse mecanismo possui a característica de reduzir as deformações verticais da camada de base, devido a esse aumento de rigidez. É razoável, portanto, esperar que esses efeitos resultem em menores deformações elásticas na superfície do pavimento, e assim um alívio no efeito da fadiga sobre a camada de revestimento asfáltico.

Outro mecanismo decorrente do uso de camada geossintética decorre da alteração do estado de tensões e deformações no subleito. Esse efeito é causado pela melhor distribuição de tensões provenientes da base sobre o subleito, uma vez que a tensão vertical nas camadas diretamente abaixo da região de aplicação da carga se reduz com o aumento da rigidez da camada de base. Assim, as tensões no subleito são reduzidas e mais amplamente distribuídas, protegendo o mesmo e as camadas superiores de grande e concentradas deformações. Essa melhoria do estado de tensões no subleito caracteriza o terceiro mecanismo de atuação do reforço (ANTUNES, 2008, p. 15).

Segundo Antunes (2008, p. 15), “O quarto mecanismo do reforço resulta de uma redução da tensão cisalhante no solo de subleito.”. Love<sup>8</sup> et al. (1987 apud ANTUNES, 2008, p. 15) demonstraram que com incrementos na solicitação à tração do reforço pela base, diminuem as tensões cisalhantes transmitidas da camada de base para o subleito. Sendo assim, com o decréscimo das tensões cisalhantes e tensões verticais, há uma redução no estado de carregamento, implicando em menores deformações verticais no subleito.

Graças aos mecanismos citados, é proporcionada uma economia de material através da redução das espessuras de projetos de camadas granulares (TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 153). A figura 7 demonstra esquematicamente essa redução de espessura. Trichês e Bernucci (2004, p. 155) ainda finalizam afirmando que “Estudos desenvolvidos por Anderson e

---

<sup>8</sup> LOVE, J. P.; BURD, H. J.; MILLIGAN, G. W. E.; HOULSBY, G. T. Analytical and Model Studies of Reinforcement of a Layer of Granular Fill on a Soft Clay Subgrade. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 24, n. 4, p. 611-622, 1987.



Killeavy<sup>9</sup> (1982) e Cancelli<sup>10</sup> et al. (1996) demonstraram que as geogrelhas são superiores aos geotêxteis quando empregados como elemento de reforço.”.

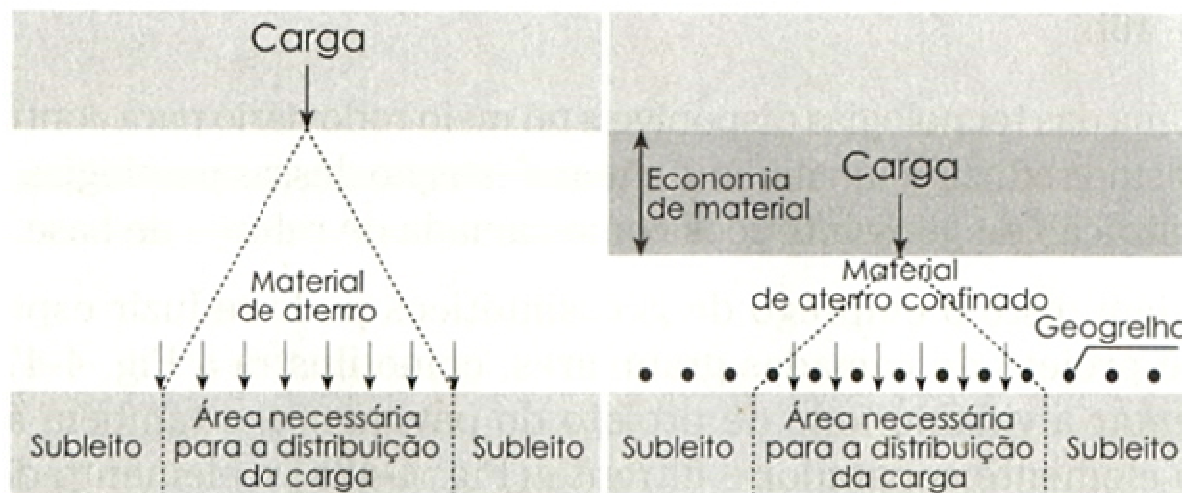


Figura 7: aumento da área de distribuição de tensões no subleito diminuindo as espessuras das camadas (TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 155)

<sup>9</sup> ANDERSON, P., E KILLEAVY, M., Geotextiles and Geogrids: Cost Effective Alternative Materials for Pavement Design and Construction. In: CONFERENCE OF GEOSYNTHETICS, 1989, San Diego. **Proceedings...** Easley: IGS, 1989.

<sup>10</sup> CANCELLI, A., MONTANELLI, F., RIMOLDE, P., E ZHAO, A., Full Scale Laboratory Tests on Geosynthetics Reinforced Paved Roads. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EARTH REINFORCEMENT, 1996, Fukuoka. **Proceedings...** Rotterdam: A. A. Balkema, 1996.

## 4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM BASE REFORÇADA COM GEOGRELHA

Segundo a *International Geosynthetic Society*<sup>11</sup> (2002 apud TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 162), “O dimensionamento de estruturas de rodovias pavimentadas reforçadas com geossintéticos pode ser feito através de vários métodos.”. Assim, nesse capítulo serão apresentados os métodos de dimensionamento de pavimentos reforçados mais utilizados e citados na literatura.

O primeiro a ser apresentado é o método proposto por Milligan<sup>12</sup> et al. (1989 apud GARCEZ, 1999, p. 63), seguindo pelo proposto por Giroud e Noiray<sup>13</sup> (1981 apud GARCEZ, 1999) e uma adaptação do método de dimensionamento de pavimentos da AASHTO proposta por Trichês e Bernucci (2004, p. 162). Lages (2004, p. 30) explica que os métodos expostos se diferenciam especialmente pela forma de quantificar o efeito do carregamento dinâmico causado pela passagem dos veículos e na forma de considerar esse efeito no cálculo das espessuras das camadas.

### 4.1 MÉTODO PROPOSTO POR MILLIGAN E OUTROS (1989)

O método parte do princípio que o carregamento oriundo do tráfego transmite para o subleito tanto tensões normais quanto tensões cisalhantes. Assim, com a inclusão da geogrelha estes esforços cisalhantes são absorvidos pelo reforço, e apenas forças verticais são transmitidas para o subleito (LAGES, 2004, p. 47).

Apesar de o método ser baseado em carregamentos estáticos, Milligan<sup>14</sup> et al. (1989 apud GARCEZ, 1999, p. 64) sugerem que se utilize a relação entre uma carga estática e um

---

<sup>11</sup> INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY, **Mini Lecture Series**. South Carolina, 2002.

<sup>12</sup> MILLIGAN, G. W. E.; HOULSBY, G. T.; JEWELL, R. A.; BURD, H. J. A New Approach to the Design of Unpaved Roads. **A. Ground Engineering**, v. 22, n. 8, p. 37-42, 1989.

<sup>13</sup> GIROUD, J. P., NOIRAY, L., Geotextile-Reinforced Unpaved Road Design. **ASCE Journal Geotechnical Engineering, Division**, v. 107, n. 9, p. 1233-1254, 1981.

<sup>14</sup> MILLIGAN, G. W. E.; HOULSBY, G. T.; JEWELL, R. A.; BURD, H. J. A New Approach to the Design of Unpaved Roads. **A. Ground Engineering**, v. 22, n. 8, p. 37-42, 1989.

carregamento cíclico proposta por De Groot<sup>15</sup> et al. (1986 apud GARCEZ, 1999, p. 64) dada por:

$$N^{0,16} = \frac{P_s}{P_n} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$P_s$ : carga estática que leva a ruptura;

$P_n$ : carga cíclica;

$N$ : número de repetições da carga  $P_n$ .

A partir de considerações sobre a geometria do problema, é possível calcular a pressão vertical admissível utilizando a equação 2:

$$p = (2 + \pi) \cdot Su \cdot \left( \frac{B'}{B} \right) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$p$ : pressão vertical admissível (kPa);

$Su$ : resistência ao cisalhamento;

$B$ : largura da área sobre a qual a tensão atua na superfície;

$B'$  é a largura da área sobre a qual a tensão atua no subleito devido ao espriamento.

Lages (2004, p. 50) explica ainda que através do equilíbrio de esforços horizontais atuantes na camada, pode-se calcular a tensão de cisalhamento requerida ( $\tau_r$ ) na base da mesma utilizando a equação 3:

$$\tau_r \cdot B' = \frac{(K_a - K_p)}{2} \cdot \gamma \cdot D^2 + \frac{K_a \cdot p \cdot B}{\tan \beta} \cdot \ln \left( \frac{B'}{B} \right) - p \cdot B \cdot \tan \delta \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

---

<sup>15</sup> DE GROOT, M., JANSE, E., MAAGDENBERG, T. A. C., VAN DEN BERG, C. Design Method and Guidelines for Geotextile Application in Road Construction. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOTEXTILES, 1986, Viena, **Proceedings...** Easley: I.G.S., 1986.

$$K_a = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \quad (\text{equação 4})$$

$$K_p = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$K_a$ : coeficiente de empuxo ativo;

$K_p$ : coeficiente de empuxo passivo;

$\gamma$ : peso específico do material;

$D$ : espessura da camada;

$\beta$ : ângulo de espraçamento;

$\delta$ : ângulo de atrito mobilizado entre a base da área carregada e o aterro.

Uma vez que o método se fundamenta na idéia de que o reforço é que irá suportar as tensões de cisalhamento, Milligan<sup>16</sup> et al. (1989 apud GARCEZ, 1999, p. 67) definem que o esforço de tração (T) na geogrelha será igual ao valor da tensão de cisalhamento requerida.

Além disso, Garcez (1999, p. 67) explica que este método de dimensionamento também recomenda uma verificação quanto a possibilidade de ruptura da camada de aterro granular por puncionamento, baseada na proposta de Vesic (1975 apud GARCEZ, 1999, p. 67). A carga máxima suportada pela camada granular (p) é dada pela equação 6:

$$p = \gamma \cdot B \cdot 2 \cdot \left( \left( \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \cdot e^{\pi \cdot \tan\phi} \right) + 1 \right) \cdot \tan\phi \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$\gamma$ : peso específico do material;

$\delta$ : ângulo de atrito mobilizado entre a base da área carregada e o aterro;

$B$ : largura da área sobre a qual a tensão atua na superfície.

---

<sup>16</sup> MILLIGAN, G. W. E.; HOULSBY, G. T.; JEWELL, R. A.; BURD, H. J. A New Approach to the Design of Unpaved Roads. **A. Ground Engineering**, v. 22, n. 8, p. 37-42, 1989.

## 4.2 MÉTODO DE GIROUD E HAN (2003)

Dentre os métodos para dimensionamento de estruturas com base reforçada com geossintético de rodovias não-pavimentadas, destaca-se a recente contribuição de Giroud e Han<sup>17</sup> (2003 apud TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 161). Os autores propuseram o dimensionamento da espessura de camada de revestimento primário considerando-se a presença de um geossintético, segundo a equação 7.

$$h = r \cdot \frac{0,868 + (0,661 - 1,006 \cdot J^2) \cdot \left(\frac{r}{h}\right)^{1,5} \cdot \log N}{1 + 0,204 \cdot (R_E - 1)} \cdot \left( \sqrt{\frac{\frac{P}{\pi \cdot r^2}}{\left(\frac{s}{f_s}\right) \cdot \left(1 - 0,9 \cdot \exp\left(-\left(\frac{r}{h}\right)^2\right)\right) \cdot N_c \cdot f_c}} - 1 \right) \quad (\text{equação 7})$$

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 segundo a AASHTO;

P: carga de roda (kN);

r: raio da área de contato da roda equivalente (m);

$R_E$ :  $3,48 \text{CBR}_{\text{base}}^{0,3} / \text{CBR}_{\text{sub}}$ ;

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

$f_s$ : fator igual a 75 mm;

$N_c$ : fator de capacidade de carga;

$f_c$ : fator igual a 30 kPa.

Segundo Trichês e Bernucci (2004, p. 162):

Em aplicações do método Giroud-Han, sugere-se, com base em estudos de campo de bases não reforçadas, que a razão  $R_E$  seja limitada no valor máximo de 5,0, levando em conta a dificuldade de compactação dessas bases granulares sobre solos de baixa capacidade de suporte. No entanto, sabe-se que o uso de geogrelha permite uma melhora substancial nos serviços de compactação de bases granulares sobre subleitos de baixa capacidade de suporte, o que permitiria a elevação da razão  $R_E$ .

<sup>17</sup> GIROUD, J. P., HAN, J. Design Method for Tensar Geogrid: Reinforced Unpaved Roads. **Technical Documents**. Disponível em: <[http://www.tensar.co.uk/download\\_brochures.asp?act=new](http://www.tensar.co.uk/download_brochures.asp?act=new)> . Acesso em: 2003.

### 4.3 MÉTODO ADAPTADO DA AASHTO (1993)

Trichês e Bernucci (2004, p. 162) sugerem o emprego de uma adaptação do método de pavimentos flexíveis indicado pelo Guia da *American Association of State Highway and Transportation Officials*<sup>18</sup> (1993 apud TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 162), cuja equação original, ou seja, sem considerar o reforço, é:

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(N_e + 1)^{5,19}}} + \log W_{18} - 2,32 \cdot \log M_R + Z_R \cdot S_0 - 8,27 = 0 \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$\Delta PSI$ : perda de serventia esperada durante o período de projeto (tipicamente, entre 1,7 e 2,2);

$W_{18}$ : número de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 82 KN, calculado com os coeficientes da AASHTO;

$M_R$ : 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 -1,34 para probabilidade de êxito de 80 e 91%, respectivamente);

$S_0$ : 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 é calculado pela equação 8:

$$SN = \alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2 m_2 + \alpha_3 D_3 m_3 \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$\alpha_i$ : coeficiente estrutural do material da camada i;

$D_i$ : espessura da camada i (polegadas);

$m_i$ : coeficiente de drenagem do material da camada i.

<sup>18</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials, **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, DC, 1993.

Trichês e Bernucci (2004, p. 154) relatam ainda que “Em quase todos os experimentos, o principal indicador que quantifica a melhoria do desempenho do pavimento com a inclusão do geossintético é a taxa de benefício de tráfego, TBR (*traffic benefit ratio*) [...]”, definida por:

$$TBR = \frac{N_{geo}}{N} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$N_{geo}$ : número de repetições do eixo padrão de 82 kN que produz um determinado afundamento em trilha de roda ( $T_R$ ) no pavimento com geossintético;

$N$ : número de repetições do eixo padrão de 82 kN que produz o mesmo afundamento em trilha de roda ( $T_R$ ) no pavimento sem o geossintético.

Em geral, adota-se  $T_R$  entre 2,0 e 2,5 cm para indicar a falha ou **ruptura** da estrutura do pavimento.

Assim, para contemplar o aumento da vida útil ou período de projeto que a geogrelha proporciona, pode-se adaptar o método da AASHTO incluindo a TBR conforme a equação 10:

$$9,36 \cdot \log_{10}(SN_{BR} + 1) + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} - \log \frac{W_{18}}{TBR} + 2,32 \cdot \log M_R + Z_R \cdot S_0 - 8,27 = 0 \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

TBR: taxa de benefício de tráfego, geralmente igual a 2, segundo Trichês e Bernucci (2004, p. 163);

$SN_{BR}$ : número estrutural considerando-se a contribuição da geogrelha.

Trichês e Bernucci (2004, p. 163) ainda afirmam que “[...] preferencialmente, o geossintético deverá apresentar um módulo secante superior a 600 kN/m, [...]”, e que este método não é recomendado para o dimensionamento de pavimentos submetido a cargas especiais (empilhadeiras, transportadores de contêineres, entre outros). Para esses casos recomenda-se proceder à análise de tensão/deformação através de programas computacionais apropriados.

## 5 DADOS DE TRECHO EXPERIMENTAL – RODOVIA ENTRE ITABIRA E SENHORA DO CARMO/MG

Para a condução do estudo, foi necessário o levantamento de dados de trechos experimentais sob diferentes condições, de tal modo a poder confrontar os resultados obtidos com os esperados segundo diferentes métodos de cálculo. No entanto, apenas um estudo se adequou à realidade desse trabalho: o estudo de Saraiva (2006) sobre o trecho experimental na rodovia de ligação entre as cidades Itabira e Senhora do Carmo, ambas em Minas Gerais.

Saraiva (2006) descreve o estudo realizado como a construção e monitoramento de trecho experimental de 300 m de extensão inseridos na rodovia, dividido em seis seções testes. Foi utilizada uma mistura composta de rejeito de mineração de ferro, argila e **jigue** – resíduo do processo de jigagem usado no beneficiamento do carvão mineral - como material de base, combinando-se com geossintéticos de acordo com a seção. Além dos ensaios específicos todos os ensaios tradicionais de controle de qualidade na construção de superestrutura rodoviária foram executados e comparados com os resultados dos equipamentos de monitoramento.

Ainda segundo Saraiva (2006), o método do projeto foi essencialmente experimental comportando um programa de medições utilizando-se sensores *strain gage* tipo KM - 120 instalados na posição vertical e horizontal, nas camadas de base, sub-base e subleito, debaixo do caminho de rolamento com o objetivo de registrar deformações transversais e longitudinais em todas as camadas do pavimento. Sensores de temperatura e umidade foram colocados na camada de base. Os dados foram coletados através de uma *datalogger* e processados no Excel, comparando-se com as deflexões obtidas por Viga Benkelman e ensaios realizados com aparelho Geogauge.

As seções possuem 50 m de comprimento por 7,20 m de largura, e diferenciam-se pela substituição do material da base, além da inserção de materiais geossintéticos em duas das seções, em relação ao projeto de pavimentação original da rodovia (SARAIVA, 2006, p. 11).

A seção estudada, denominada **seção 06**, foi construída seguindo exatamente a composição estrutural do projeto original da rodovia, com exceção da substituição da camada de cascalho



de itabirito por uma mistura de rejeitos de minério de ferro e argila e da inserção de geogrelha entre as camadas de base e sub-base (figura 8) (SARAIVA, 2006, p. 14).

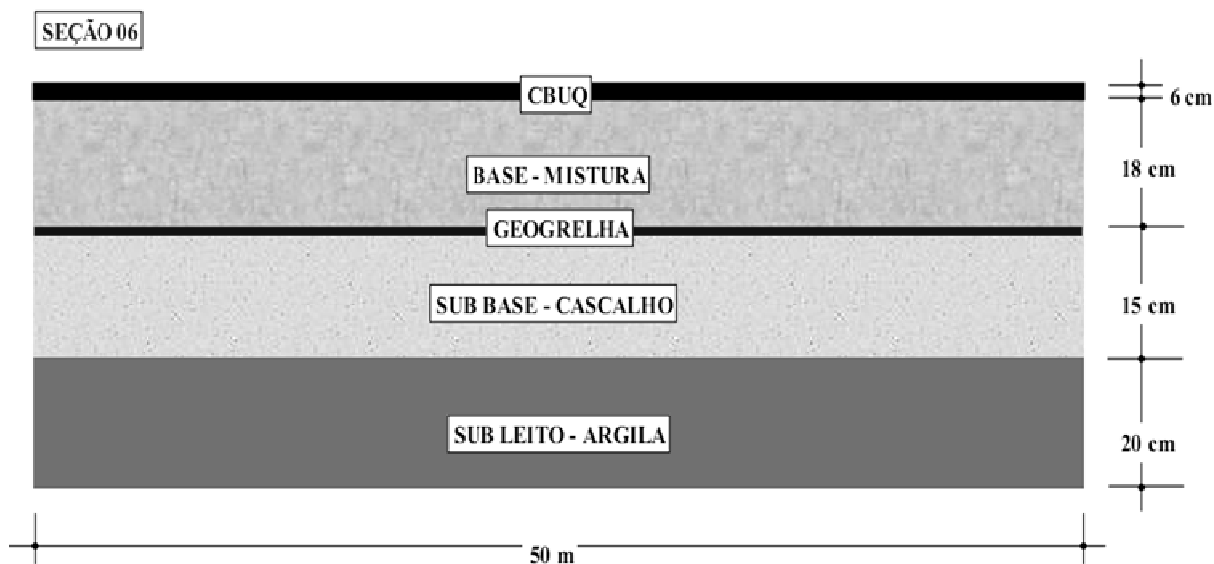


Figura 8: camadas da estrutura da seção 06 - Base de mistura e geogrelha entre base e sub-base (SARAIVA, 2006, p. 15)

A geogrelha utilizada nessa seção foi o modelo 65/65-30T da marca Fortrac, fabricada pela Huesker, tratando-se de uma geogrelha flexível de poliéster e de elevada rigidez. A geogrelha possui gramatura igual a  $430 \text{ g/m}^2$ , resistência nominal à tração mínima de  $65 \text{ kN/m}$  na sua direção principal e de  $65 \text{ kN/m}$  na sua direção transversal (geogrelha bi-direcional), com uma malha aberta quadrada de  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  (SARAIVA, 2006, p. 19).

Segundo Saraiva (2006, p. 21), o traço desenvolvido para o material de base que melhor atendeu às normas do DNIT, foi obtido para as seguintes proporções dos materiais em volume: 70% de jigüe, 20% de argila e 10% de rejeito fino. De tal forma que a mistura assim obtida apresentou as seguintes características:

- a) CBR = 73%;
- b) expansão = 0,18%;
- c) limite de liquidez = 15%;
- d) índice de plasticidade = 3,8%.

Para o cálculo da tensão aplicada ao pavimento, admitiu-se uma carga do caminhão-padrão igual a  $82 \text{ kN}$  no eixo traseiro com rodas duplas. Cada conjunto de pneus atua com  $41 \text{ kN}$  em

uma área de 1.820 cm<sup>2</sup>, correspondente a uma área aproximada de contato dos pneus com 52 cm de largura por 35 cm de comprimento, conforme ilustrado na figura 9 (SARAIVA, 2006, p. 24).

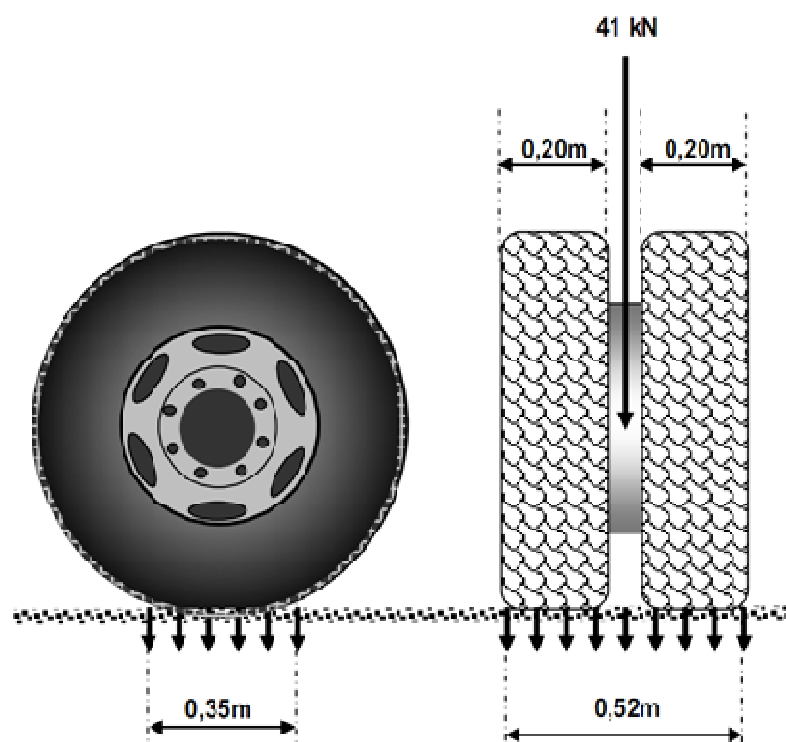


Figura 9: área de contato entre os pneus e o pavimento (SARAIVA, 2006, p. 25)

Ainda segundo Saraiva (2006, p. 74):

Os procedimentos para medições das deflexões no pavimento seguiram as prescrições da norma DNER - ME 24/94<sup>19</sup>. A viga Benkelman foi utilizada para os levantamentos defletométricos e a determinação das bacias de deslocamento das seções de estudo, uma vez atendidas as especificações dos valores de grau de compactação e umidades. Foram realizados quatro ensaios em cada seção, sobre as camadas de subleito, sub-base, base e asfalto. Os ensaios no trecho experimental foram realizados com um peso padrão de 82 kN no eixo simples traseiro de caminhão basculante de rodas duplas, com pneus calibrados com 560 kPa. No [...] [quadro 2], são apresentados os resultados dos ensaios realizados com a viga Benkelman no trecho experimental.

Paralelamente ao monitoramento desta seção, é interessante ressaltar o desempenho da seção 02, pois a mesma possui exatamente a mesma composição estrutural da seção 06, porém sem a geogrelha, conforme a figura 10. além de ambas seções estarem em regiões de corte.

<sup>19</sup> Brasil. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Medidas de deflexões no pavimento através da viga Benkelman** – ME 24-95. MT – Normas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ, 6p.

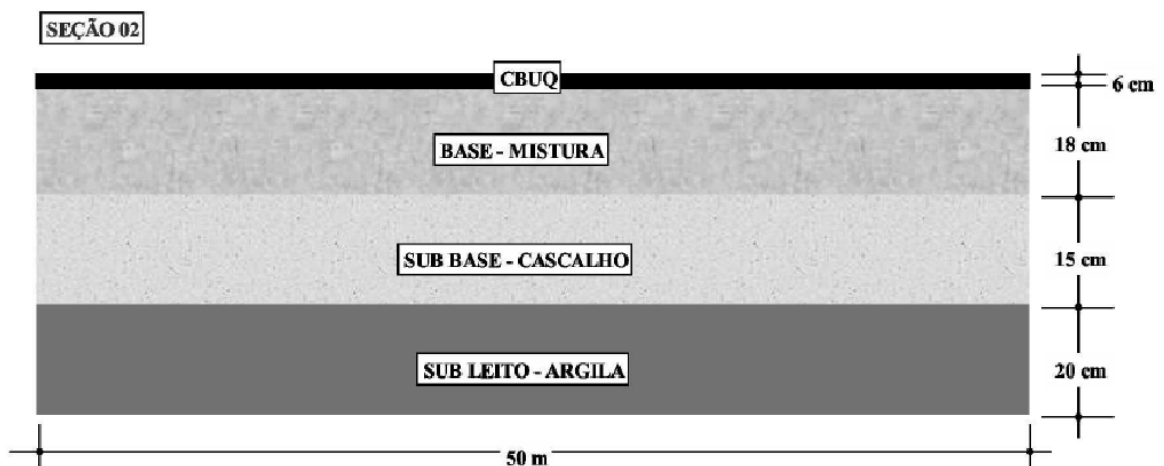


Figura 10: camadas da estrutura da seção 02 - Base de mistura sem geogrelha entre base e sub-base (SARAIVA, 2006, p. 13)

Nos quadros 2 a 5 são apresentados os resultados das deflexões de campo obtidos com uso de Viga Benkelman, relativos a cada camada do pavimento da seção 06 e da seção 02 (SARAIVA, 2006, p. 78).

Viga Benkelman- Leituras em 0,01mm					
Seção	Estaca	CBUQ	Base	Sub-base	Subleito
06	167+0	36	52	60	66
	167+10	44	52	68	68
	168+0	40	52	70	70
	168+10	34	48	56	78

Quadro 2: dados de campo das deflexões medidas com viga Benkelman. (SARAIVA, 2006, p. 74)

Viga Benkelman- Leituras em 0,01mm					
Seção	Estaca	CBUQ	Base	Sub-base	Subleito
02	157+0	30	48	84	154
	157+10	36	62	164	173
	158+0	42	66	224	168
	158+10	38	58	200	132

Quadro 3: dados de campo das deflexões medidas com viga Benkelman. (SARAIVA, 2006, p. 74)

Seção	D0	D25	D50	D75	D100	D125	D150	Raio
Deflexões do subleito								
Seção 6	72	50	42	28	18	10	4	142
	68	49	42	28	18	10	6	164
Deflexões da sub-base								
Seção 6	60	40	36	28	20	14	12	156
	56	32	30	28	20	10	4	130
Deflexões da base								
Seção 6	52	32	8	6	4	2	0	156
	48	28	8	4	2	2	0	156
Deflexões do CBUQ								
Seção 6	36	32	6	4	2	0	0	781
	34	28	14	6	2	0	0	521

Quadro 4: leituras de campo - deflexões em 0,01 mm e raios em metros.  
(SARAIVA, 2006, p. 78)

Seção	D0	D25	D50	D75	D100	D125	D150	Raio
Deflexões do subleito								
Seção 2	248	206	154	100	92	68	44	74
	248	208	158	108	85	62	40	78
Deflexões da sub-base								
Seção 2	84	24	14	8	6	4	2	52
	200	60	24	20	16	12	4	22
Deflexões da base								
Seção 2	48	38	8	4	2	0	0	313
	58	48	14	10	2	0	0	313
Deflexões do CBUQ								
Seção 2	30	24	10	6	4	2	0	521
	38	34	18	8	6	4	0	781

Quadro 5: leituras de campo - deflexões em 0,01 mm e raios em metros.  
(SARAIVA, 2006, p. 78)

Saraiva (2006, p. 91), analisando os resultados obtidos, afirma que “A composição da base com elementos sintéticos de reforço promovem efetivamente uma redução das deformações verticais e horizontais da via.”, e que “A aplicação dos reforços (tanto geotêxtil como geogrelha) mostrou-se mais eficaz quando posicionados sob a base.”.

Também concluiu que, apesar disso, a aplicação de geossintéticos sob a base pode comprometer o serviço de compactação, devido a impossibilidade de uso de grades de disco, sob penas de danificar o reforço (SARAIVA, 2006, p. 112).

## 6 ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO

Para a análise de dimensionamento realizada neste trabalho, foi preciso primeiramente definir qual dos métodos utilizar. Assim, dos diversos métodos descritos na bibliografia, um foi definido como padrão, utilizando-se como critérios a facilidade de aplicação, a necessidade de poucos ensaios e a forma como os resultados se apresentam.

Dessa forma, o método a ser utilizados nesta análise será a adaptação do método da AASHTO (1993). Esse método apresenta a vantagem em relação aos outros de já ser mais familiar a maioria dos projetistas, uma vez que apresenta apenas a introdução da variável TBR na equação original do método de dimensionamento de pavimentos da AASHTO (1993), conforme Trichês e Bernucci (2004, p. 162). Além disso, não existe a necessidade da realização de muitos outros ensaios que não os já tradicionais em projetos de pavimento.

Analisando os processos de cálculo envolvidos no método, observa-se a necessidade da definição do valor de TBR para o cálculo. Para fins de projeto, esse valor deve ser avaliado segundo ensaios específicos para o caso, pois varia conforme as características da geogrelha, a interação da mesma com a camada granular, e a espessura da camada granular.

Para a avaliação do dimensionamento de uma estrutura, será realizado o dimensionamento de uma estrutura hipotética, com valores de entrada do processo bastante comuns, descrita por Trichês e Bernucci (2004, p. 165). Por tratar-se de um estudo teórico, serão avaliados diferentes valores de TBR, de modo a verificar a sensibilidade de variação das espessuras das camadas segundo essas variações de TBR.

A estrutura a ser analisada possui as características apresentadas no quadro 6:

$\Delta\text{PSI}$	2,2
$W_{18}$	$3 \cdot 10^6$
$M_{R\text{sub}}$	421 kgf/cm <sup>2</sup> (6000 psi)
$E_{\text{ca}}$	33000 kgf/cm <sup>2</sup> (470800 psi)
$E_{\text{b}}$	3000 kgf/cm <sup>2</sup> (42850 psi)
$E_{\text{sb}}$	1500 kgf/cm <sup>2</sup> (21400 psi)
$Z_{\text{R}}$	-1,282
$S_0$	0,45

Quadro 6: dados de projeto para estrutura a ser dimensionada.  
(TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 166)

O  $M_{\text{R}}$  escolhido equivale aproximadamente a um valor de CBR de 4%, segundo modelo considerado pela AASHTO (1993 apud TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 166). Além disso, os valores de módulo de elasticidade das camadas de concreto asfáltico, base e sub-base ( $E_{\text{ca}}$ ,  $E_{\text{b}}$  e  $E_{\text{sb}}$ , respectivamente) conduzem aos valores de coeficientes estruturais ( $\alpha$ ) que aparecem no quadro 7.

Camada	$\alpha$
Revestimento (concreto asfáltico)	0,44
Base (brita graduada)	0,157
Sub-base (areia)	0,14

Quadro 7: valores dos coeficientes estruturais para estrutura a ser analisada.  
(TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 167)

Os coeficientes de drenagem foram considerados igual a 1 para todas camadas, uma vez que as condições climáticas brasileiras permitem que o pavimento fique exposto a níveis de umidade próximos ao de saturação em menos de 5% do tempo (TRICHÊS; BERNUCCI, 2004, p. 167), e os materiais escolhidos apresentam razoável qualidade de drenagem.

Utilizando os dados de entrada do problema, e o método descrito do capítulo 4.3, obteve-se a seguinte relação entre TBR e o número estrutural SN:

TBR	SN
1,0	4,203608
1,4	4,00716
1,6	3,93109
1,8	3,864885
2,0	3,806373
2,2	3,754023
2,4	3,70671
2,6	3,663593
2,8	3,62402
3,0	3,587478

Quadro 8: valores de números estruturais para cada valor de TBR analisado.

Foi realizado o cálculo com o valor de TBR igual a 1 para simular a mesma estrutura sem o reforço da geogrelha.

Utilizando os valores de número estrutural e os coeficientes estruturais, pode-se chegar às espessuras de cada camada do pavimento utilizando-se a equação 8 do capítulo 4.3.

Para fins de comparação de resultados, foram fixados os valores de espessura do revestimento em 10 cm e da base em 20 cm, de forma a obter a variação da espessura da camada de sub-base conforme a variação do TBR. A figura 11 mostra esquematicamente a composição da estrutura do pavimento.

As espessuras da camada de sub-base encontradas pelo método de dimensionamento adaptado da AASHTO (1993) para cada valor de TBR avaliado encontram-se no quadro 8. Já a figura 12 mostra um gráfico que relaciona a espessura da camada de sub-base com o TBR, tornando visível a sensibilidade no cálculo das espessuras de sub-base alterando o TBR.



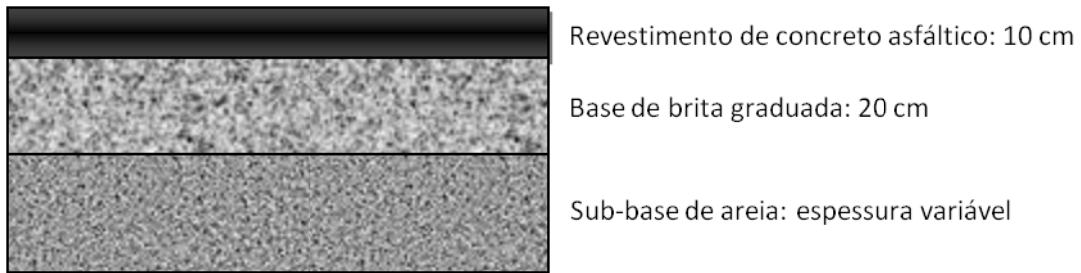


Figura 11: camadas da estrutura do pavimento dimensionado.

TBR	Espessura da camada de sub-base, em cm
1	23
1,4	19
1,6	18
1,8	17
2	16
2,2	15
2,4	14
2,6	13
2,8	12
3	12

Quadro 9: Espessuras da camada de sub-base para cada valor de TBR analisado.

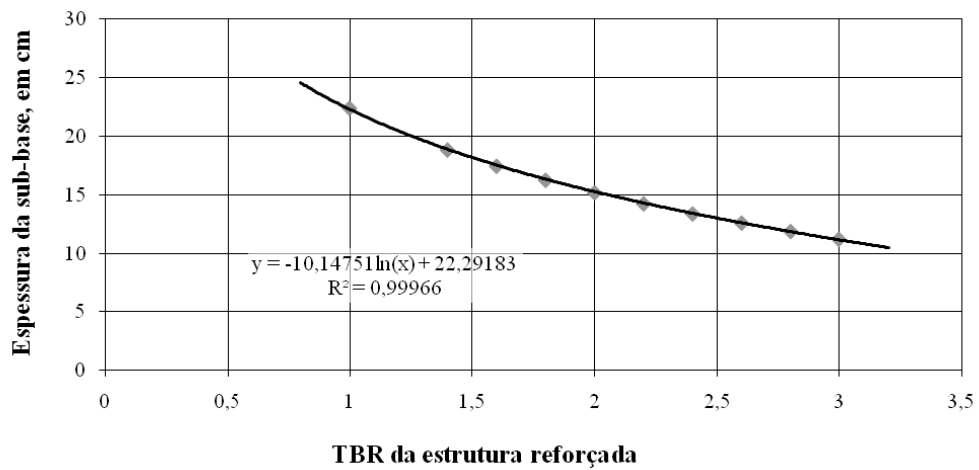


Figura 12: relação entre espessura da camada de sub-base e TBR.

A análise do quadro 8 e do gráfico da figura 12 mostra que a economia de material na sub-base pode chegar a 11 cm, no caso da TBR chegar ao valor de 3. No entanto Trichês e Bernucci (2004, p. 163) avaliam que o valor usual para a TBR é 2, o que leva, nesse caso, a uma economia de material de 7 cm.

## 7 CONCLUSÕES

Embora a teoria indique grandes vantagens no uso de geossintéticos como reforço, a prática indica que os ganhos de desempenho são razoavelmente limitados, como evidenciou o estudo de Saraiva (2006). Porém já é possível afirmar, como citaram Anderson e Killeavy<sup>20</sup> (1982 apud TRICHÊS, BERNUCCI, 2004, p. 155), Cancelli<sup>21</sup> et al. (1996 apud TRICHÊS, BERNUCCI, 2004, p. 155) e Saraiva (2006, p. 112) que dentre os materiais geossintéticos abordados, aquele que obtém melhor desempenho como elemento de reforço é a geogrelha, especialmente quando aplicada sob a base.

O dimensionamento de pavimento realizado neste estudo mostrou o impacto da variação da TBR sobre a espessura da sub-base. Isso revelou a importância de se garantir índices mais altos de TBR para os projetos, de modo aperfeiçoar o uso do material geossintético, através de ensaios e estudos mais aprofundados sobre o assunto.

Não foi encontrado na literatura, qualquer método de dimensionamento de reforço geossintético para base de pavimentos que projetasse valores de deflexões para os pavimentos, tornando impossível a comparação de resultados teóricos e projeções com os observados em campo, uma vez que a deflexão é um dos principais indicadores de desempenho das estruturas e que levantamentos deflectométricos são cada vez mais comuns.

Isso torna a avaliação do desempenho das estruturas reforçadas uma tarefa bastante complicada, especialmente pela limitação dos métodos quanto a estabelecerem resultados que possam ser mensurados posteriormente, a fim de se poder analisar o investimento realizado e até mesmo para possíveis correções no método.

Por outro lado, Garcez (1999, p. 82) ressalta ainda que trabalhos que apresentam ou discutem essas propostas de métodos sequer trazem exemplos de dimensionamentos detalhados, fazendo com que a completa compreensão da proposta seja demasiadamente desgastante e onerosa, desestimulando, dessa forma, a aplicação desta tecnologia.

---

<sup>20</sup> ANDERSON, P., E KILLEAVY, M., Geotextiles and Geogrids: Cost Effective Alternative Materials for Pavement Design and Construction. In: CONFERENCE OF GEOSYNTHETICS, 1989, San Diego. **Proceedings...**

<sup>21</sup> CANCELLI, A., MONTANELLI, F., RIMOLDE, P., E ZHAO, A., Full Scale Laboratory Tests on Geosynthetics Reinforced Paved Roads. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EARTH REINFORCEMENT, 1996, Fukuoka. **Proceedings...**

Faz-se necessário, portanto, mais estudos sobre métodos de dimensionamento de estruturas de pavimentos com base reforçada com geossintéticos, com propostas de formulações de levar em conta fatores que poderão ser facilmente avaliados no futuro, tais como as deflexões e os afundamentos em trilha de roda. Além disso, o uso da TBR como única variável relacionada ao reforço não se mostra uma solução ideal, sendo necessários também estudos mais aprofundados que relacionem a TBR com a espessura e propriedades físicas da camada reforçada, além de propriedades do próprio material de reforço.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Introdução. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- ANTUNES, L. G. S. **Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Propriedades, Ensaio e Normas. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- GARCEZ, G. L. **Aplicação de Geossintéticos como Reforço de Base em Obras Viárias**. 1999. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- LAGES, R. G. **Aplicação de Métodos Convencionais no Dimensionamento de Pavimentos com Base Reforçada Utilizando Geossintéticos**. 2004. 229 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- LOVE, J. P. **Model Testing of Geogrids in Unpaved Roads**. 1984. 219 f. Thesis (Doctoral in Philosophy) – Mathematical, Physical & Life Sciences Division, University of Oxford, Oxford, UK.
- MAUBEUGE, K.; LESNY, C. Reinforcement of Base Courses with Geogrids - Related Issues. In: PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE AND EXHIBITION, 2008, Cancun. **Proceedings...** Easley: IGS, 2008. p. 936-943. 1 CD.
- MEDEIROS, H. Reforço Plástico. **Revista Técnica**. n.138, set. 2008. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/138/imprime101848.asp>>. Acesso em: 29 nov. 2009.
- SARAIVA, S. L. C. **Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários**. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- TANG, X.; PALOMINO, A. M.; CHEHAB, G. R. Laboratory Evaluation of Geogrids for Flexible Pavement Reinforcement. In: PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE AND EXHIBITION, 2008, Cancun. **Proceedings...** Easley: IGS, 2008. p. 973-982. 1 CD.
- TRICHÊS, G.; BERNUCCI, L. B. Reforço de Base de Pavimentos. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.