FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Reforço de Estradas Não Pavimentadas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Natacha Carolina Matias Rodrigues

Orientadores

Maria Isabel Moita Pinto

Adelino Jorge Lopes Ferreira

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2015

"Difficulties do come in life,
but to overcome difficulties,
one needs to be strong
& strength comes only through
spiritual" knowledge.""

(Sri Sri)

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, aos meus pais, Jaime e Paula, que me deram esta enorme oportunidade de aprender, conhecer e crescer, ao longo dos últimos anos, tanto a nível académico como pessoal. Também lhes estou grata pela educação o mais completa possível que me deram e por me terem ajudado a tornar-me numa pessoa responsável e agradecida por tudo aquilo a que tive direito e que consegui por direito. Um especial agradecimento às minha irmãs, principalmente à minha irmã Catarina, por me ter apoiado e ter dado forças em todo este trajeto académico e pessoal.

Agradeço em especial ao meu namorado, Diogo, pelo apoio, pelo companheirismo e pelo incentivo que me deu para atingir todos os meus objetivos de vida profissional e pessoal. Todo o carinho e força que ele me deu em todo este percurso, marcaram-me de tal forma que tornaram-me na pessoa que sou hoje. Estou-lhe inteiramente grata por ele ter feito e continuar a fazer parte da minha vida.

Agradeço também a todos as minhas amigas, em especial à Paula, Lissa, Raquel e Márcia, que me apoiaram, acompanharam e alegraram em todo este percurso. Também agradeço às minhas amigas e colegas Andreia, Eliana, Ana Isabel, Filipa, Noela e Júlia por todo o apoio e companheirismo ao longo destes cinco anos académicos.

Quero agradecer aos meus orientadores Professora Maria Isabel Moita Pinto e Professor Adelino Jorge Lopes Ferreira, pelas dúvidas esclarecidas, pela constante ajuda e pelo acompanhamento que me deram ao longo desta dissertação. De agradecer muito também ao senhor José António pela paciência, pela ajuda e pelo tempo despendido no laboratório.

Agradeço também aos meus amigos e colegas, Vera Matias, Liliana Relvão, João Carmona e Manuel Silva, que me foram ajudando e feito companhia no laboratório e na sala de perfil.

Agradeço à BBF – Tecnologias do Ambiente, pela cedência da geogrelha usada nos ensaios.

Agradeço também ao laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural pela disponibilização da prensa para os ensaios de compactação

RESUMO

As estradas não pavimentadas representam uma grande percentagem da totalidade das estradas, não só em países em desenvolvimento, mas também em países ditos desenvolvidos. O facto de a estrada permitir o acesso da população de uma zona rural a uma zona urbana, ou vice-versa, faz desta infraestrutura uma obra muito importante no desenvolvimento da região e, até mesmo, do país. De referir, o facto de este tema não ser ainda um tema muito estudado, o que torna, este trabalho, ainda mais aliciante.

A construção da estrada está associada a problemas de estabilidade e deformabilidade. A sua construção deve ser pensada para que este tipo de problemas seja minimizado e para que estas tenham a maior durabilidade possível. Para tal, existem várias técnicas de reforço que permitem colmatar e prevenir futuros danos. O uso de geogrelhas, como reforço, faz todo o sentido devido às suas propriedades de aumento da resistência e da estabilidade do solo.

Pretende-se analisar, laboratorialmente, a influência do tipo de solo na construção da estrada, a influência de uma fundação instável, a influência da secagem do solo e, ainda, a influência da colocação de uma geogrelha sobre a fundação instável. Todas estas análises são feitas com quatro tipos de solo preparados em laboratório. A avaliação da resistência da estrada será feita por intermédio de ensaios de pista, que fornecem informação das deformações do solo aquando a passagem dos veículos sobre o solo. O objetivo é saber qual (ais) o (s) solo (s) de eleição para cada uma das situações de ensaio e qual o solo que se ajusta melhor a todas elas.

Do presente trabalho, conclui-se que o comportamento dos solos é realmente muito influenciado pelo tipo de solo e, ainda mais influenciado pela existência ou não de uma fundação instável e de um reforço.

ABSTRACT

The unpaved roads represent a large percentage of all roads in a country not only in developing countries but also in the developed ones. The road allows the access of population from a rural area to an urban area which makes this infrastructure highly important to the development of the region and even the country. It should be noted the fact that this subject isn't yet a widely studied topic which makes this work even more important and interesting.

The construction of the road is associated to stability and deformability problems. This type of construction should be planned in order to minimize this problems and to guarantee the highest possible durability. For that, there are several reinforcement techniques which are able eliminate and prevent future damages. The use of geogrids as reinforcement makes actually sense because of its high resistance and soil stability properties.

The dissertation intends to analyze, in laboratory, the influence of a certain type of soil in the road construction, the influence of an unstable foundation, the influence of using the soil dried and also the influence of the placement of a geogrid above the unstable foundation. All these analyses are made by Wheel Tracking Machine tests that provide information about the soil deformation during the vehicles circulation. The aim of this work is to know which soil represents the best choice for each test and which one fits better in all the tests.

From this study it was concluded that the soil behavior is highly influenced by the soil type and even more influenced by the existence or not of an unstable foundation and a reinforcement.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS i
RESUMO ii
ABSTRACT iii
ÍNDICE iv
ÍNDICE DE FIGURAS vi
ÍNDICE DE QUADROS viii
SIMBOLOGIA x
ABREVIATURAS x
1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Contexto do trabalho 1
1.2 Estrutura da dissertação 2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 Introdução 3
2.2 Constituição da estrada 6
2.2.1 Geometria 7
2.2.2 Solo 8
2.2.3 Elementos de drenagem 9
2.3 Características técnicas da estrada 10
2.3.1 Capacidade de suporte 10
2.3.2 Geometria do traçado, aderência e drenagem de águas 11
2.4 Danos mais comuns 12
2.5 Avaliação das condições de circulação da estrada 16
2.6 Aspetos económicos 18
2.6.1 Níveis de qualidade da estrada 18
2.6.2 Custos dos utilizadores da estrada e das autoridades rodoviárias 20
2.6.3 Alternativa-zero e análise sensitiva 22
2.7 Reforço de estradas não pavimentadas 23
2.7.1 Geossintéticos 23
3 PROGRAMA LABORATORIAL: MATERIAIS E MÉTODOS 27
3.1 Introdução 27
3.2 Materiais utilizados nos ensaios 27
3.2.1 Solos 27
3.2.2 Caracterização física dos solos 28

3.2.3 Geogrelha ... 32
3.2.4 Esponja ... 33
3.3 Equipamento utilizado nos ensaios ... 35
3.3.1 Caixa de ensaios ... 35
3.3.2 Prensa hidráulica para compactação ... 35
3.3.3 Prensa para ensaio de CBR ... 36
3.3.4 Máquina Wheel Tracking ... 37
3.4 Metodologia de ensaio ... 38
3.4.1 Preparação dos provetes ... 38
3.4.2 Plano de Ensaios ... 39
4 ANÁLISE DE RESULTADOS ... 41
4.1 Introdução ... 41
4.2 Influência do tipo de solo ... 41
4.3 Influência da secagem ... 43
4.4 Influência da esponja ... 45
4.5 Influência do reforço ... 48
4.5.1 Influência da geogrelha no sentido longitudinal à caixa de ensaios ... 48
4.5.2 Influência da geogrelha no sentido da largura da caixa de ensaios ... 51
4.5.3 Influência do sentido de colocação do reforço ... 53
4.6 Comparação de todos os ensaios ... 55
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS ... 59
5.1 Conclusões ... 59
5.2 Trabalhos futuros ... 61
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ... 62
7 OUTRA BIBLIOGRAFIA RELEVANTE ... 65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perfil transversal de uma estrada não pavimentada (Santos, 2013)..... 7
Figura 2.2 – Danos mais comuns em estradas não pavimentadas (Santos et al., 1988). 13
Figura 2.3 - Seção transversal com severidade média (1) e com severidade alta (2) (ODA,1995).....15
Figura 2.4 - Relação entre a rugosidade média da estrada e o total de custos operacionais de veículos (adaptado de DOT, 1990).....20
Figura 2.5 - Mecanismos de reforço da geogrelha (Archer, 2008).....26
Figura 3.1 – Curvas granulométricas dos solos em estudo 28
Figura 3.2 – Curvas de compactação pesada.....29
Figura 3.3 – Influência do CBR (%) e do material de aterro sobre a espessura do pavimento (Paiva et al., 2015; FCE, 2004) 30
Figura 3.4 - Geogrelha utilizada nos ensaios de pista (nestas imagens também é a visível a esponja por baixo da geogrelha); (1) – Geogrelha colocada no sentido transversal à caixa de ensaios; (2) - Geogrelha colocada no sentido transversal à caixa de ensaios.....32
Figura 3.5 – Esponja usada nos ensaios de pista 33
Figura 3.6 – Ensaio de deformação/recuperação da esponja 34
Figura 3.7 – Deformação e recuperação da esponja quando sujeita a carregamentos.....34
Figura 3.8 – Caixa de ensaios para acondicionamento do solo durante os ensaios.....35
Figura 3.9 – (1) – Prensa hidráulica usada para densificar o solo na caixa de ensaio; (2) – Software da prensa usado para controlar as tensões exercidas 36
Figura 3.10 – (1) – Prensa usada para os ensaios de CBR; (2) – emersão de um molde usado para um dos CBR.....37
Figura 3.11 – Esquema do equipamento Wessex S867 38
Figura 3.12 – Imagem do interior da câmara de acondicionamento dos provetes e realização de ensaios 38
Figura 3.13 – Esquema da compactação dos solos A, B, C e D.....39
Figura 3.14 - Esquemas de compactação com esponja e solo com teor ótimo (1) e com esponja e geogrelha (2).....40

Figura 4.1 – Deformação superficial nos ensaios não reforçados com os teores ótimos de humidade 42
Figura 4.2 – Deformação superficial dos solos A (1) e D (2) 43
Figura 4.3 – Deformação superficial das amostras secas sem reforço 43
Figura 4.4 – Comparação das deformação dos solos secos e com os teores ótimos 44
Figura 4.5 – Aspeto da plataforma após ensaio com solo A (1) e solo D (2) 45
Figura 4.6 – Deformação dos solos com teores ótimos e com a colocação de esponja 46
Figura 4.7 – Comparação das deformações dos solos secos com os solos quando estão com o teor ótimo 47
Figura 4.8 – Aspeto da plataforma após ensaio com o solo A com a colocação da esponja. ..47
Figura 4.9 – Deformação dos solos quando colocada a geogrelha como reforço, no sentido longitudinal da caixa de ensaios 49
Figura 4.10 – Aspeto da plataforma após ensaio do solo A com reforço colocado no sentido longitudinal da caixa de ensaios 50
Figura 4.11 – Comparação das deformações dos solos com esponja e com a esponja mais a geogrelha no sentido longitudinal da caixa de ensaios 50
Figura 4.12 – Deformação dos solos quando colocada a geogrelha como reforço, no sentido transversal à caixa de ensaios 52
Figura 4.13 - Comparação das deformações da plataforma com esponja, e com a esponja mais a geogrelha no sentido transversal da caixa de ensaios 53
Figura 4.14 – Comparação do comportamento dos solos nos dois sentidos de colocação da geogrelha 54
Figura 4.15 – Comparação de todos os ensaios para o solo A 55
Figura 4.16 – Comparação de todos os ensaios para o solo B 56
Figura 4.17 – Comparação de todos os ensaios para o solo C 56
Figura 4.18 – Comparação de todos os ensaios para o solo D 57
Figura 4.19 – Variação da deformação para os solos tipo B, C e D 58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Percentagem de estradas não pavimentadas relativas ao total de estradas (km) em diversos países (cia.gov) 5
Quadro 2.2 – Perfil transversal tipo (adaptado de ANMP, (s.d)) 8
Quadro 2.3 – Classes de Terrenos de Fundação (retirado de ANMP, (s.d.)) 11
Quadro 2.4 – Comparação dos métodos de avaliação (adaptado de Ferreira, 2007).....17
Quadro 2.5 - Defeitos avaliados em cada um dos métodos (adaptado de Ferreira, 2007).....17
Quadro 2.6 – Níveis de qualidade de estradas analíticos para estradas pavimentadas e não pavimentadas (adaptado de Archando-Callao, 2004) 19
Quadro 2.7 – Velocidades dos veículos, VOC e RUC, para estação seca e estação húmida (Archando-Callao, 2004) 21
Quadro 2.8 – Custos de investimento de manutenção do nível de qualidade de uma estrada (×1000$***/km) (Archando-Callao, 2004) 22
Quadro 2.9 – As principais funções de cada tipo de geossintético (adaptado de Barbosa, 2010) ……..24
Quadro 3.1 – Tipos de solos usados nos ensaios laboratoriais.....27
Quadro 3.2 – Propriedades dos quatro solos 28
Quadro 3.3 – Expansibilidades dos solos.....31
Quadro 3.4 – Classificação de cada solo segundo o Triângulo de Feret e a classificação ASTM 31
Quadro 3.5 – Classificação dos solos segundo a classificação AASHO 31
Quadro 3.6 - Propriedades da geogrelha 32
Quadro 3.7 - Ensaios realizados 40
Quadro 4.1 – Melhorias (%) obtidas em cada tipo de solo após secagem dos mesmos. 45
Quadro 4.2 – Agravamento (%) dos resultados após colocação da esponja 48
Quadro 4.3 – Melhorias do comportamento dos solos após colocação da geogrelha no sentido longitudinal à caixa de ensaios 51
Quadro 4.4 – Melhoria conseguida com a colocação da geogrelha no sentido transversal da caixa de ensaios 53
Quadro 4.5 – Melhorias conseguidas nos ensaios feitos para as duas direções de colocação da geogrelha 54

Quadro 4.6 – Os primeiros e segundos melhores solos para cada tipo de ensaio 58

SIMBOLOGIA

CO_2 – Dióxido de carbono
G – Densidade das partículas sólidas
w_L – Limite de liquidez
w_P – Limite de plasticidade
w – Teor em água
w_{ot} – Teor em água ótimo
γ_d – Peso volúmico seco

ABREVIATURAS

AASHO – American Association State Highway Officials
ASTM – American Society for Testing and Materials
CBR – California Bearing Ratio
DVI – Detailed Visual Inspection
ERCI – Earth Road Condition Index
HDM4 – Highway Development and Management Model
GPM – Gravel Paser Manual
IRI – International Roughness Index
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP – Norma Portuguesa
PEAD – Polietileno de alta densidade
PET – Poliéster
PP – Polipropileno
PSR – Present Serviceability Rating
RCS – Road Condition Survey
RSMS – Road Surface Management System
RVF – Rede Viária Florestal
URCI – Unsurfaced Road Condition Index

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do trabalho

As estradas não pavimentadas resultaram da evolução, ao longo dos tempos, dos caminhos de terra, e foram criadas com o propósito de permitir a ligação entre zonas rurais e urbanas, isto para proporcionar a acessibilidade da população a serviços e bens indispensáveis (hospitais, centros de saúde, escolas, centros comerciais, etc.) bem como troca de produtos (agrícolas, florestais, pecuários, etc.). Esta acessibilidade torna-se muito importante em termos económicos, sociais e culturais, ou seja, é de extrema importância para o bom desenvolvimento do país. É de salientar que a opção por este tipo de estradas resulta, essencialmente, do seu baixo custo de construção e tolerância a grandes deformações.

Estas estradas, na sua maioria, não estão adaptadas para suportar o tráfego diário de camiões e equipamentos agrícolas de grande porte, principalmente em épocas de chuva, quando esta capacidade de suporte tende a diminuir, tornando-as ainda mais vulneráveis a deformações, ruturas localizadas e erosões. Para agravar ainda mais o problema, muitas vezes, estas estradas são construídas sobre fundações instáveis, ou seja, sobre fundações onde a capacidade de suporte é muito baixa.

Tendo como principal preocupação a segurança e o conforto na circulação, torna-se necessário adotar medidas de manutenção após a construção e entrada ao serviço destas estradas. Esta medida é importante para todos os tipos de estradas, mas especialmente para as não pavimentadas.

O melhoramento e reforço do solo, tem por objetivo a redução da deformabilidade e/ou permeabilidade e/ou o aumento da resistência. Esta melhoria consegue-se através de processos físicos e/ou químicos e/ou pela inclusão de materiais resistentes à tração. Existem hoje em dia vários processos de melhoramento e reforço de solos economicamente viáveis.

Uma solução, muito utilizada atualmente como reforço são os geossintéticos, como geogrelhas e geotêxteis. O geossintético quando utilizado como reforço, aumenta a resistência e melhora a capacidade de suporte devido, essencialmente, à redistribuição de tensões, à restrição lateral e ao efeito membrana (Neves, 2013).

Esta dissertação tem como objetivo principal o estudo do comportamento de quatro tipos de solos quando sujeitos à passagem de veículos. O programa experimental consiste na realização de ensaios de pista para cada tipo de solo, sendo estudados solos sem reforço, reforçados com geogrelha, no estado húmido e no estado seco e ainda solos sobre uma esponja para simular a existência de um solo fraco e deformável por baixo da camada de desgaste da estrada não pavimentada.

1.2 Estrutura da dissertação

Após o presente capítulo introdutório que tem como objetivo o enquadramento da dissertação, seguem-se cinco capítulos que descrevem todo o trabalho realizado.

No capítulo 2 faz-se o ponto de situação sobre o estado de conhecimento e as investigações mais recentes sobre as estradas não pavimentadas, abordando ainda levemente a temática dos solos reforçados.

No capítulo 3 procede-se à caracterização/descrição dos materiais utilizados na elaboração desta dissertação, incidindo principalmente na caracterização geotécnica dos solos escolhidos e preparados para os ensaios, bem como na caracterização da esponja e da geogrelha usadas nos ensaios. Ainda é apresentado o plano de ensaios, e descrito o procedimento experimental, desde a homogeneização do solo, preparação dos provetes até à realização dos ensaios laboratoriais de pista.

O capítulo 4 contempla a análise e discussão dos resultados obtidos para cada tipo de ensaios laboratoriais realizados.

Por último, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões mais relevantes e propostas para a continuação do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

As estradas não pavimentadas são geralmente usadas para baixos volumes de tráfego e como estradas de acesso. Como este tipo de estradas apresenta um baixo custo de construção, permitem que um determinado local se torne acessível, e com fluxo de mercadorias (essencialmente agrícolas e florestais) e serviços, promovendo assim o desenvolvimento económico, social e cultural, tanto da área em que se situa a estrada como do país.

As estradas não pavimentadas podem ser divididas em três tipos de estradas (DOT, 1990):

- **Caminhos de terra** – estradas de baixo volume de tráfego e, que servem de acesso a espaços rurais. Estas estradas não são obra da engenharia e não permitem, na maioria das vezes, a passagem de veículos em condições de piso molhado. Em condições normais de piso apenas passam 5 ou menos veículos por dia nestas estradas. Estas são normalmente usadas como estradas de acesso local, usadas por proprietários de terrenos e por pequenas comunidades, e em regra não são construídas nem mantidas por uma autoridade rodoviária.
- **Estradas de terra** – estradas construídas sem utilização de cascalho, sendo a vegetação removida e o solo ligeiramente compactado através da passagem de veículos. Muitas vezes o que existe é um reaproveitamento do solo, retirado da construção das valetas, para fins de ajustamentos na forma da estrada. Este tipo de estradas são geralmente construídas por uma autoridade rodoviária ou por uma instituição de desenvolvimento regional e são consideradas importantes para o desenvolvimento económico e social da área**.** Contrariamente aos caminhos de terra, estas são sujeitas a manutenções periódicas.
- **Estradas de cascalho –** estradas construídas com utilização de cascalho, tendo normalmente em consideração, para a sua conceção, um padrão e uma largura específicos. Os alinhamentos verticais e horizontais da estrada são normalmente feitos ou refeitos tendo em conta os padrões apropriados. Neste tipo de estrada a manutenção é feita mais regularmente e sistematicamente, obtendo-se um melhor nível de serviço, embora a rigidez varie consideravelmente com o tempo e dependa muito das atividades de manutenção.

A rede viária florestal (RVF) é uma rede de estradas que permite aceder e servir espaços florestais, mais concretamente, o acesso aos aglomerados e a outras infraestruturas, aos povoamentos e produtos florestais. Na RVF podem ser integradas quaisquer estradas que atravessem ou permitam o acesso aos espaços florestais, incluindo:

- Vias classificadas pelo Plano Rodoviário Nacional;
- Vias classificadas integrantes do Plano dos Caminhos Municipais do Continente;
- Outras vias de comunicação do domínio público;
- Vias do domínio privado, incluindo as vias do domínio do Estado e as dos terrenos comunitários.

Ou seja, a RVF inclui os três tipos de estradas não pavimentadas, descritas anteriormente. Esta rede ainda permite o acesso para execução de trabalhos de silvicultura preventiva e infraestruturação, para as ações de vigilância e dissuasão ou para a primeira intervenção e combate estendido. Isto permite o apoio ao setor agroflorestal e à proteção contra incêndios. A construção e manutenção destas estradas e caminhos florestais torna-se, por isso, de grande importância. Desta forma, conclui-se que a RVF deve ser devidamente planeada e construída, não só por todas as vantagens referidas mas também com vista a reduzir o custo inerente à sua utilização e manutenção e para que os impactes ambientais associados a este tipo de estrada sejam minimizados (DUDF, 2012).

As estradas não pavimentadas representam, a nível global, uma grande percentagem da rede viária total, como se pode observar no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Percentagem de estradas não pavimentadas relativas ao total de estradas (km) em diversos países (cia.gov)

Continente/Subcontinente	**País**	**Estradas não pavimentadas (%)**	**País**	**Estradas não pavimentadas (%)**
África (77%)	África do Sul	79%	Moçambique	79%
	Angola	90%	Nigéria	85%
	Etiópia	86%	Quénia	93%
	Guiné	90%	Serra Leoa	92%
América Central e Caraíbas (30%)	Belize	83%	Haiti	82%
	Costa Rica	74%	Honduras	77%
	Cuba	51%	Nicarágua	86%
	El Salvador	53%	Panamá	58%
América do Norte (39%)	Canadá	60%	México	64%
	EUA	35%	-	-
América do Sul (84%)	Argentina	70%	Paraguai	85%
	Bolívia	85%	Uruguai	90%
	Brasil	87%	Venezuela	66%
	Equador	85%	-	-
Ásia Central (25%)	Rússia	28%	Uzbequistão	13%
Ásia (Este e Sudeste) (22%)	Camboja	94%	Indonésia	43%
	Coreia do Norte	97%	Japão	20%
	Filipinas	74%	Laos	99%
	Mongólia	90%	-	-
Ásia (Sul) (52%)	Afeganistão	71%	Sri Lanka	85%
	Bangladesh	95%	-	-
Europa (44%)	Bélgica	22%	Hungria	92%
	Escócia	42%	Macedónia	32%
	Estónia	82%	Noruega	19%
	Finlândia	36%	Polónia	32%
	Islândia	63%	Portugal	14%
	Grécia	65%	Roménia	41%
	Letónia	80%	Suécia	77%
Médio Oriente (33%)	Arábia Saudita	79%	Irão	19%
	Azerbaijão	49%	-	-
Oceânia (61%)	Austrália	57%	Nova Zelândia	34%

Da análise do Quadro é possível concluir que a América do Sul, a África e a Oceânia são os três continentes/subcontinentes com maior percentagem de estradas não pavimentadas relativamente ao total de estradas. Dentro de cada continente/subcontinente há, por vezes, grandes diferenças de país para país parecendo África e América do Sul os mais homogéneos. Na Europa esta diferença é muito acentuada, sendo visível que os países de leste são os que apresentam maior percentagem de estradas não pavimentadas (Estónia, Letónia, Hungria, Macedónia, Polónia) justificando, desta forma, a elevada percentagem de estradas não pavimentadas na Europa. Os países nórdicos como a Finlândia, a Suécia, a Noruega e a Escócia que apresentam também uma razoável percentagem de estradas não pavimentadas devem esta percentagem à aposta na indústria florestal, na indústria da pesca e no turismo. Na Oceânia, mais concretamente na Austrália, a percentagem de estradas não pavimentadas, deve-se em grande parte à necessidade daquele país em se ligar a grandes áreas. Relativamente a nível nacional, verifica-se que Portugal é o país com uma das menores percentagens de estradas não pavimentadas, ainda assim como uma percentagem considerada razoável. Ainda é de referir que a percentagem de estradas não pavimentadas não parece estar diretamente influenciada pela riqueza do país. Por exemplo, há países como os EUA, o Canadá e o Japão que fazem parte dos G7 e que apresentam, mesmo assim, percentagens de estradas não pavimentadas elevadas. A Rússia, que fez parte dos antigos G8, também apresenta uma percentagem considerável. É, ainda, de realçar os cerca de 90% referentes ao Uruguai, Paraguai e Brasil, que estão relacionados principalmente com o transporte das produções industrial e agrícola, e os 35% e 60% relativos aos EUA e Canadá, respetivamente. Avaliando estes números é possível afirmar que, de facto, as estradas não pavimentadas são uma realidade importante, mesmo nos países ditos "desenvolvidos" e, como é improvável que a percentagem global diminua consideravelmente no futuro próximo, torna-se muito importante a discussão e estudo de técnicas de construção e melhoramento das estradas não pavimentadas.

2.2 Constituição da estrada

Os aspetos mais importantes da constituição de uma estrada não pavimentada e que devem ser assunto de grande atenção são: a geometria; os materiais utilizados; e os elementos de drenagem. A conceção de estradas de baixa intensidade de tráfego, como é o caso das não pavimentadas, apresentam algumas características diferentes das de tráfego intenso (ANMP, (s.d.)):

- Os dados para projeto, nomeadamente geotécnicos e de tráfego estão, na maioria das vezes, pouco desenvolvidos;
- Os materiais usados são, muitas vezes, materiais presentes no local, de qualidade e origem diversas;
- Os processos construtivos são variados e predominantemente locais.

2.2.1 Geometria

Relativamente aos aspetos geométricos da estrada, estes incluem, em termos globais, os perfis longitudinal e transversal.

Relativamente ao perfil longitudinal, este deve ser, por questões económicas, o mais adaptado possível ao relevo embora não deva utilizar elevadas pendentes longitudinais por forma a assegurar boas condições de visibilidade, enquadramento no meio ambiente, bom sistema de drenagem, etc. Deve dar-se especial importância aos custos de construção e manutenção (Santos, 2013).

O perfil transversal inclui a via, as bermas, as valetas e os taludes (Figura 2.1). A segurança, a capacidade e a economia são fatores importantes a ter em consideração na seleção das componentes dos perfis transversais (ANMP, (s.d.)). O perfil transversal deve permitir uma circulação segura e deve garantir um sistema de drenagem apropriado. A via deve ter uma largura a variar entre 4,0 a 7,0 m, dependendo do volume de tráfego. Caso a via tenha 6 metros permite o cruzamento de dois veículos pesados a velocidade moderada, caso a largura seja de 5,5 metros permite o cruzamento de um veículo pesado e de um veículo ligeiro. Se a largura for apenas de 5 metros, vai permitir o cruzamento de dois veículos ligeiros em condições normais, e o cruzamento com um pesado a velocidade reduzida (ANMP, (s.d.)). A inclinação transversal deve permitir a drenagem das águas pluviais, sendo, desta forma, o terreno inclinado para ambos os lados a partir do eixo (como mostra a Figura 2.1). Caso a superfície da estrada seja composta por argila, as inclinações devem ser ligeiramente superiores às referidas. A inclinação transversal deve variar entre 3% e 6%. Estas larguras e inclinações devem ser definidas por forma a permitir uma circulação segura dos veículos (Santos, 2013; ANMP, (s.d.)).

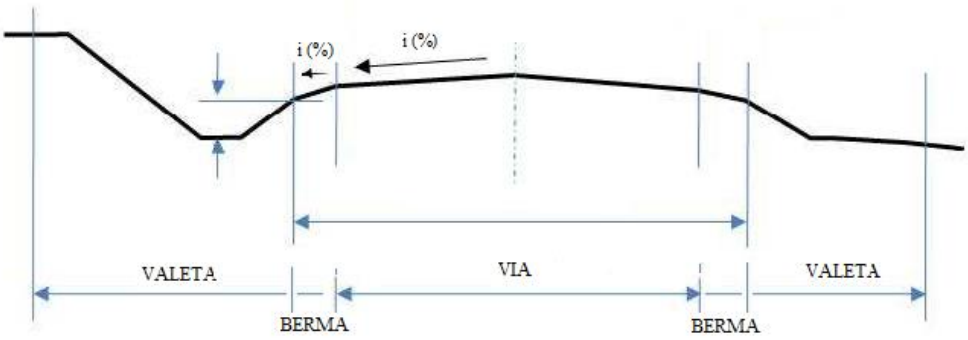


Figura 2.1 - Perfil transversal de uma estrada não pavimentada (Santos, 2013).

Quadro 2.2 – Perfil transversal tipo (adaptado de ANMP, (s.d))

Largura da via (m)	Largura máxima das bermas (m)
6,0	1,25
5,5	1,00
5,0	0,75

2.2.2 Solo

As estradas podem ser constituídas por três camadas: a camada de desgaste; a camada de base; e a fundação do pavimento. A camada de desgaste, para além de ser importante a nível de suporte de carga deve possuir características que permitam a circulação de veículos nas devidas condições de conforto e segurança. A camada de base é um elemento estrutural muito importante em estradas de baixo tráfego, porque é a camada que transmite cargas à fundação. Considera-se a fundação do pavimento, os terrenos subjacentes que condicionam o seu comportamento. A espessura desta camada de fundação varia, normalmente, entre 0,5 e 1,0 m (ANMP, (s.d.)).

Relativamente à espessura mínima das camadas de desgaste e de base, os valores recomendados são de 1,0 m, enquanto as máximas recomendadas são de 2,0 m, nunca devendo exceder 1,5 vezes o tamanho máximo das partículas do solo da camada (Santos, 2013).

Na construção de uma estrada não pavimentada o solo normalmente usado é o solo local, caso este apresenta as características adequadas. O solo deve ser devidamente compactado por forma a possibilitar a passagem de tráfego nas devidas condições. Quando o solo é heterogéneo, a colocação das camadas de solo deve ser feita tendo em conta a qualidade do material, ou seja, a camada superior é preenchida com o solo de melhores características, isto tendo em conta que esta é a camada que fica mais afetada com a passagem dos veículos (Santos, 2013). Para esta camada ter o escoamento devido, deve ter uma percentagem mais elevada de finos do que cascalho, pois caso haja pequenas quantidades de finos, a superfície não fica em boas condições, principalmente em épocas secas, tendo em conta que não há agregação do solo (DEP, 2010). Por outro lado, caso haja uma quantidade de finos superior á desejável, poderão ocorrer deformações na estrada, nas épocas húmidas. Na generalidade, o solo com as melhores características deve conter material granular e uma quantidade suficiente de material fino (argila e/ou areia siltosa), isto para que haja boa arrumação entre os materiais aquando a sua compactação, para que não haja formação de covas excessivas e superfícies escorregadias (em épocas húmidas), nem formação de poeiras (em épocas secas).

2.2.3 Elementos de drenagem

Quando as estradas não pavimentadas, quer pela sua topografia quer pela sua geometria, não são bem geridas, podem ser uma ameaça muito grande à qualidade da água, devido à erosão. Projetos mal executados podem contribuir para o escoamento de água poluída ou para a poluição difusa. Desta forma, é muito importante que os elementos de drenagem existam e que sejam funcionais (MDEP, 2001).

Os elementos de drenagem são dos elementos mais importantes para o bom funcionamento das estradas. Tendo em conta que as estradas não pavimentadas estão bastante expostas às condições climáticas e ao tráfego, torna-se crucial garantir que estas possuam um bom sistema de drenagem para que haja uma rápida remoção de água da plataforma por forma a evitar erosão e perda de capacidade de suporte. A erosão causada pelo escoamento no leito e nas margens da estrada é um dos principais fatores de degradação da mesma. Cerca de 90% dos sedimentos produzidos em áreas florestais provêm de estradas, sendo a drenagem inadequada um dos principais fatores responsáveis por essas perdas (Silva, 2009). Para o dimensionamento do sistema de drenagem é essencial conhecer a pluviosidade da zona, o tráfego associado e as características fisiográficas e de ocupação do solo (Santos, 2013).

Um sistema de drenagem é constituído tanto por elementos superficiais como subterrâneos, cada um deles com elementos longitudinais e transversais. O objetivo da drenagem superficial é evitar a acumulação de águas, enquanto que o objetivo da drenagem subterrânea é evitar a subida do nível freático até ao nível da plataforma.

A drenagem superficial longitudinal é conseguida através de valas, valetas e canais que poderão ser revestidos (com cobertura vegetal, enrocamento, gabião, colchão reno ou material rígido como o betão) ou não revestidos (Santos, 2013). O recurso ao revestimento em betão pode ser a solução mais eficiente em termos hidráulicos mas é a menos utilizada devido aos custos associados (Fortunato et al., 2013). Os elementos utilizados na drenagem subterrânea longitudinal são os drenos longitudinais, constituídos por filtros e drenos que podem ser colocados numa vala profunda preenchida com material drenante.

Quanto aos elementos de drenagem superficial transversal os mais utilizados são as condutas e passagens hidráulicas. As passagens hidráulicas permitem recolher as águas provenientes da drenagem longitudinal e ainda devem permitir minimizar as alterações nas linhas de água e evitar o estrangulamento da largura do leito de cheia. Os elementos de drenagem subterrânea transversal bastante utilizados são as condutas e os drenos transversais.

2.3 Características técnicas da estrada

Para a estrada poder ser considerada em bom estado tem, obrigatoriamente, de ter a superfície (camada de desgaste, plataforma) em bom estado. Este depende do seu material (tipo de solo), dos fenómenos meteorológicos, do tráfego e da manutenção. Também deve apresentar uma boa resistência para que possa suportar as cargas exercidas pelas rodas dos veículos sem que destas resultem deformações excessivas. A capacidade de suporte depende acima de tudo das características do material de superfície e da resistência que o solo oferece às variações de teores de humidade. Estas estradas devem também possuir um bom sistema de drenagem, isto por forma a evitar possíveis fenómenos de erosão.

2.3.1 Capacidade de suporte

Tendo em conta as características dos solos encontrados ao longo da estrada, a capacidade de suporte da fundação pode variar consideravelmente ao longo do perfil longitudinal. A capacidade de suporte é a resistência que o solo tem à deformação sob a ação de cargas. A capacidade de suporte dos solos é normalmente relacionada com o índice CBR (California Bearing Ratio) (ANMP, (s.d.)). Recomenda-se a utilização de reforços, em estradas não pavimentadas, apenas quando o solo de fundação apresenta um CBR inferior a 10% (Neves, 2013). O CBR é uma das variáveis mais importantes para o dimensionamento de uma estrada. Quanto maior este valor, maior é a resistência do solo e menor tem de ser a espessura do pavimento (Paiva et al., 2015). Desta forma, quanto maior a capacidade de suporte de uma estrada, maior resistência apresentará a processos erosivos e desgastes causados pelo tráfego rodoviário. Caso haja falta desta capacidade, podem ocorrer ondulações transversais, formação de rodeiras e, caso haja fortes precipitações poderá haver formação de lamas (Santos, 2013). Estes problemas e outros serão explicados em 2.4. Os problemas devido à fraca ou ausente capacidade de suporte devem-se, essencialmente, aos problemas técnicos que a fundação apresenta (material inadequado e/ou baixa compactação) e/ou devido à camada de reforço (Santos et al., 1988). Sendo a capacidade de suporte de uma fundação um dos parâmetros mais importantes para o dimensionamento dos pavimentos, foram estabelecidas as classes que constam no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Classes de Terrenos de Fundação (retirado de ANMP, (s.d.))

Classe	CBR (%)	Tipo de solo	Descrição	Reutilização		
				PIA	Corpo	PSA
S 0	< 3	OL	siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade (1)	N	N	N
		OH	argilas orgânicas de plasticidade média a elevada; siltes orgânicos. (2)	N	P	N
		CH	argilas inorgânicas de plasticidade elevada; argilas gordas. (3)	N	P	N
		MH	siltes inorgânicos; areias finas micáceas; siltes micáceos. (4)	N	P	N
S 1	≥ 3 a < 5	OL	idem (1)	N	S	N
		OH	idem (2)	N	S	N
		CH	idem (3)	N	S	N
		MH	idem (4)	N	S	N
S 2	≥ 5 a < 10	CH	idem (3)	N	S	N
		MH	idem (4)	N	S	N
		CL	argilas inorgânicas de plasticidade baixa a média argilas com seixo, argilas arenosas, argilas siltosas e argilas magras.	S	S	P
		ML	siltes inorgânicos e areias muito finas; areias finas, siltosas ou argilosas; siltes argilosos de baixa plasticidade.	S	S	P
		SC	areia argilosa; areia argilosa com cascalho. (5)	S	S	P
S 3	≥ 10 a < 20	SC	idem (5)	S	S	S
		SM-d	areia siltosa;	S	S	S
		SM-u	areia siltosa.	P	S	N
		SP	areias mal graduadas; areias mal graduadas com cascalho.	S	S	S
S 4	≥ 20 a< 40	SW	areias bem graduadas; areias bem graduadas com cascalho.	S	S	S
		GC	cascalho argiloso; cascalho argiloso com areia.	S	S	S
		GM-u	cascalho siltoso; cascalho siltoso com areia. (6)	P	S	P
		GP	cascalho mal graduado; cascalho mal graduado com areia. (7)	S	S	S
S 5	≥ 40	GM-d	idem (6)	S	S	S
		GP	idem (7)	S	S	S
		GW	cascalho bem graduado; cascalho bem graduado com areia.	S	S	S

S - admissivel; N - não admissivel ; P-possivel.

PIA - parte inferior do aterro

PSA - parte superior do aterro

Em termos de capacidade de suporte, deve ter-se em consideração o tipo de solo e respetiva compactação. Os materiais granulares, como areias e cascalhos, são os mais indicados uma vez que conferem uma melhor capacidade de suporte à fundação (Santos et al., 1988).

2.3.2 Geometria do traçado, aderência e drenagem de águas

Considera-se que uma estrada apresenta uma má geometria do traçado e más características de drenagem, quando existem irregularidades na superfície, ou seja, buracos, materiais soltos, ondulações transversais, entre outros. As condições de aderência dizem respeito às condições

de atrito que a superfície apresenta, ou seja, quando uma estrada tem boas condições de aderência, fenómenos do tipo derrapagem de veículos não acontecem (Santos et al., 1988).

Para que a estrada apresente boas condições de escoamento e de aderência, o solo que o constitui deve incluir material granular (areia e cascalho) e um material ligante, como a argila, para aglutinar os grãos do material granular. Ou seja, deve fazer-se a mistura deste material ligante com o granular e, por fim, compactar a mistura.

Existe, portanto, um leque de problemas relacionados com este tipo de condições, entre eles, os buracos generalizados, materiais granulares soltos, solo escorregadio, entre outros (Santos et al., 1988).

2.4 Danos mais comuns

As estradas não pavimentadas, se comparadas com as pavimentadas, são mais suscetíveis a sofrerem danos devido a fatores externos, como por exemplo ao tráfego rodoviário, à precipitação e a atividades de manutenção inadequada ou diminuta. Caso a estrada, para além destes fatores externos, apresentar problemas relativos ao tipo de solo, ao sistema de drenagem e à geometria da estrada, poderão ocorrer danos estruturais (incapacidade da estrutura da estrada suportar o tráfego em condições adequadas, e/ou defeitos funcionais na superfície da estrada que resultam da má seleção de materiais e de processos construtivos).

Os danos mais comuns são (Figura 2.2): rodeiras; poeiras; irregularidades; buracos; desagregação do solo; seção transversal e drenagem lateral inadequadas.

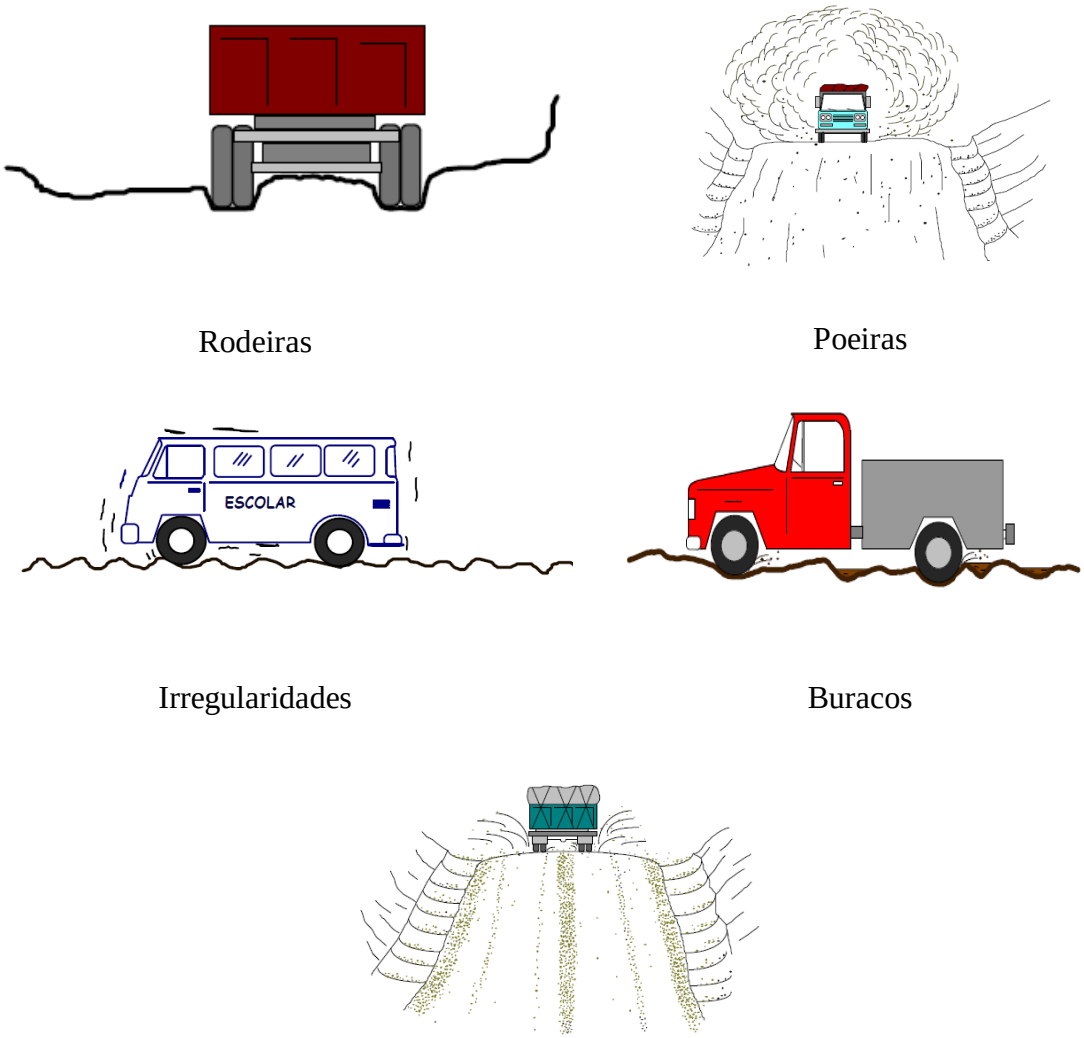


Figura 2.2 – Danos mais comuns em estradas não pavimentadas (Santos et al., 1988).

As rodeiras são definidas como depressões longitudinais, isto é, ao longo da extensão da estrada. Estas depressões provocam uma deformação permanente da camada devido à compressibilidade do solo e à passagem sucessiva das rodas dos veículos. A falta de capacidade de suporte do solo de fundação e ausência ou deficiência do sistema de drenagem em muito contribuem para o aparecimento deste tipo de problemas (Santos, 2013).

As nuvens de poeira em estradas não pavimentadas formam-se devido à perda da fração fina do solo da superfície. A formação destas poeiras deve-se à velocidade de circulação dos veículos e às propriedades dos materiais da estrada, como por exemplo o teor de humidade. De facto, constata-se um agravar deste problema em épocas secas e em solos mais argilosos que arenosos. Este problema funcional pode colocar em risco a segurança do tráfego e reduzir a vida útil dos veículos. Para além das questões de segurança inerentes a este problema, também são de salientar as questões ambientais (excesso de poeiras muitas vezes provoca a poluição do ar e é particularmente agravado em vales profundos no inverno, devido às inversões de temperatura que fazem com que o ar fique suspenso), as questões de saúde (poeiras de amianto e de sílica que podem ter origem em camadas de desgaste de cascalho, são indesejáveis em termos de saúde) e as questões de conforto (DOT, 1990).

As irregularidades são um problema funcional muito semelhante às rodeiras mas com ondulação no sentido transversal e são resultado do movimento vibratório causado pela passagem de veículos pela estrada. As causas para a ocorrência deste tipo de problemas estão muitas vezes relacionadas com o baixo índice de plasticidade do material característico do pavimento ou mesmo com a falta de compactação (Santos, 2013).

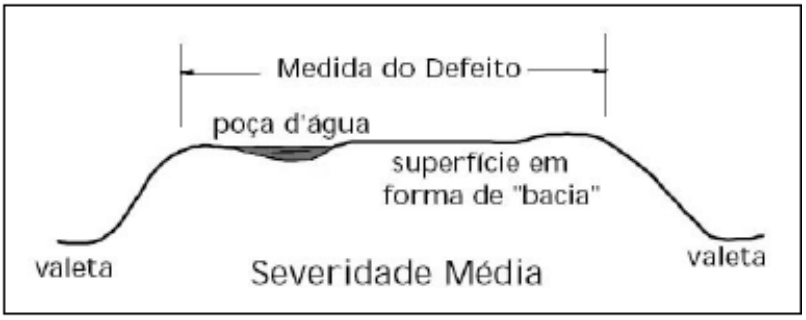
A formação de buracos, ou covas, está relacionada com a contínua expulsão de partículas sólidas da superfície aquando da passagem de veículos sobre um local onde ocorre acumulação de água por drenagem superficial inadequada (Santos et al., 1988). A formação de buracos pode estar também relacionada com a deformação das camadas de desgaste, à evolução da fissuração nas estradas (devido ao excesso de plasticidade do solo), à fraca compactação, à deficiente geometria da estrada, etc. A formação de covas desenvolve-se devido ao suporte inadequado (defeito estrutural) ou má qualidade do material. A inadequada manutenção e ineficiente drenagem podem ser também fatores agravadores deste problema (Santos, 2013).

A desagregação do solo é caracterizado pela formação de cordões laterais e no centro da via provocados pela ação do tráfego. Este problema está mais associado a solos argilosos, com rampas acentuadas, onde o material granular acrescentado ao solo não foi devidamente compactado, ou até mesmo a superfícies planas onde há escassez de material fino ligante (Santos, 2013).

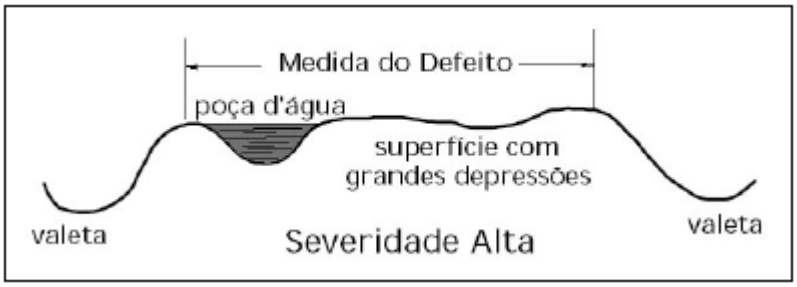
A seção transversal imprópria é o resultado de uma superfície sem inclinação transversal suficiente para a drenagem das águas. Este problema funcional consegue-se identificar pelo escoamento da água ao longo da superfície de rolamento e pela erosão associada à intensidade de precipitação (Silva, 2009).

Os níveis de severidade e extensão da seção transversal imprópria classificam-se em (Silva, 2009):

- Baixa: superfície completamente plana;
- Média: superfície em forma de “bacia”;
- Alta: grandes depressões nos trilhos das rodas na superfície da estrada.



(1)



(2)

Figura 2.3 - Seção transversal com severidade média (1) e com severidade alta (2) (ODA,1995)

Cerca de 80% dos problemas existentes nas estradas estão relacionados com a drenagem inadequada (MDEP, 2001). A drenagem inadequada é um problema funcional que consiste na acumulação de água na plataforma devido à não existência de um sistema de drenagem, ou à falta de manutenção dos dispositivos de escoamento da água. Relativamente à falta de manutenção dos elementos isto acontece quando a estrada está coberta de vegetação ou cheia de entulho que impossibilita o transporte da água pela valeta, acabando por provocar empoçamento e erosão da borda da estrada. A drenagem também pode ser classificada de acordo com os níveis de severidade, sendo baixa nos casos em que existem baixas quantidades de poças de água e ausência de vegetação e entulho, e elevada quando as poças de água começam a ser uma constante devido à deposição de vegetação e entulho sobre as valetas (Santos, 2013). Embora este seja um problema funcional muito preocupante e de evitar ao máximo, a água tem um papel positivo se estiver nas devidas quantidades e condições. A água tem efeitos positivos como permitir uma melhor compactação da superfície da estrada e, estabelecer e manter a vegetação ajudando no combate à erosão (MDEP, 2001).

2.5 Avaliação das condições de circulação da estrada

A avaliação da superfície das estradas não pavimentadas é de grande importância para planear as atividades a serem levadas a cabo para a manutenção da integridade estrutural e funcional da estrada.

Na maioria das vezes, a manutenção das estradas não pavimentadas é deficiente e, muitas vezes é totalmente inexistente por um longo período de tempo. Este facto origina problemas, que podem chegar à incapacidade de circulação de pessoas e mercadorias. Importantes são também os danos ambientais resultantes da erosão do solo que, transportados pela água da chuva, são levados e depositados em áreas agrícolas, juntamente com os químicos depositados na estrada ao longo do tempo.

A avaliação das condições da superfície das estradas não pavimentadas pode ser uma avaliação objetiva ou ter um carácter subjetivo. Nesta última, a avaliação é baseada na opinião dos utentes, empregando-se um valor definido como Present Serviceability Rating (PSR). Este valor é obtido fazendo-se uma média aritmética de notas atribuídas, a uma estrada, pelos representantes dos utentes que fazem parte da equipa de avaliação. Estes representantes, atribuem notas subjetivas, à medida que percorrem um determinado comprimento da estrada a uma certa velocidade. Estas notas têm que cumprir uma escala de valores que é devidamente definida antes da avaliação e que diz respeito aos níveis de conforto durante o trajeto do veículo. A avaliação objetiva é feita tendo em conta os danos existentes na estrada, ou seja, os tipos de danos, o grau de severidade e densidade do dano (Ferreira, 2007).

Assim, os métodos de avaliação de danos de estradas variam de país para país, pois as situações são também diferentes. É possível distinguir cinco tipos de avaliação: o *Gravel Paser (Pavement Surface Evaluation and Rating) Manual* - GPM, o *Detailed Visual Inspection* (DVI) / *Road Condition Survey* (RCS), o *Earth Road Condition Index* (ERCI), o *Unsurfaced Road Condition Index* (URCI) e o *Road Surface Management System* (RSMS) (Ferreira, 2007).

O DVI/RCS é um método utilizado no Reino Unido e inclui duas fases (Quadro 2.4): RCS e DVI. Relativamente ao RCS este pretende recolher dados relativos às condições da estrada, identificando as zonas em estado crítico que necessitam de manutenção. Quanto ao DVI este tipo de avaliação é do tipo objetiva, ou seja, passa pelo registo do tipo, da densidade e da severidade do defeito e consequente implementação das medidas para a minimização do mesmo. O URCI é utilizado nos Estados Unidos da América e mede os defeitos da superfície da estrada (indicados em 2.4) através de uma inspeção feita à estrada, dentro de um veículo que circula nessa estrada. O inspetor responsável aponta os danos encontrados ao longo da via e classifica-os. Esta inspeção é feita uma vez em cada estação do ano. O RSMS é utilizado nos

EUA e trata-se de um sistema operativo que permite fazer uma gestão tanto das estradas não pavimentadas como pavimentadas tendo em conta as várias hipóteses de manutenção. O GPM é também utilizado nos EUA e permite fazer uma avaliação visual das condições das estradas de cascalho tendo em consideração fenómenos como o tráfego e a precipitação. Quanto ao ERCI, este é usado no Egipto. Todos estes métodos pressupõem a avaliação de defeitos, defeitos estes que variam de método para método, como representado no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Comparação dos métodos de avaliação (adaptado de Ferreira, 2007)

Métodos	GPM	RCS/DVI	ERCI	URCI	RSMS
Origem	EUA	Europa	Egipto	EUA	EUA
Defeitos Avaliados	Ver tabela 2.4				
Níveis de Severidade	Para algumas classificações	Baixo, Médio, Alto	Suave e Grave	Baixo, Médio, Alto	Baixo, Médio, Alto
Forma de Medição da Densidade	Para algumas classificações	<10% 10%-50% >50%	Ocasional, frequente, extenso	Nomogramas	<10% 10%-30% >30%
Escala	1 - 5	1 - 5	0 - 100	0 - 100	0 - 100
Classificação	Péssimo – Excelente	Excelente - Péssimo	Péssimo - Excelente		

Quadro 2.5 - Defeitos avaliados em cada um dos métodos (adaptado de Ferreira, 2007)

Métodos	**Defeitos Avaliados**															
	(1) **STI**	(2) **BUR**	(3) **ROD**	(4) **OND**	(5) **DLI**	(6) **PEA**	(7) **POE**	(8) **ESC**	(9) **ATO**	(10) **SUS**	(11) **FEA**	(12) **FMC**	(13) **ALC**	(14) **EII**	(15) **PSE**	(16) **OSE**
GPM (EUA)	X	X	X	X	X	X	X	X								
RCS/DVI (Europa)	X	X	X	X		X	X	X	X							
ERCI (Egipto)	X	X	X							X	X	X	X	X	X	X
URCI (EUA)	X	X	X	X	X	X	X									
RSMS (EUA)	X	X	X	X	X	X	X									

(1) – Seção transversal inadequada; (2) – buracos; (3) – rodeiras; (4) – ondulações; (5) – drenagem lateral inadequada; (6) – perda de agregados; (7) – poeiras; (8) – espessura do cascalho; (10) – superfície saturada; (11) – falha e erosão de aterro na estrada; (12) – falha no muro de contenção; (13) – altura da superfície; (14) – estrutura ilegal de irrigação; (15) – plantas na superfície da estrada; (16) – ocupação da superfície da estrada.

Para além dos métodos de avaliação mencionados anteriormente, têm sido desenvolvidos mais alguns. Por exemplo, nos países nórdicos, como a Suécia, a análise das condições das estradas é feita recorrendo a veículos que permitem avaliar a superfície das estradas relativamente aos danos a que estas estão sujeitas devido a fenómenos como o degelo. Estes defeitos são recolhidos e posteriormente tratados através de software específico. O Banco Mundial desenvolveu também um novo projeto, HDM 4 (Highway Development and Management Model), que para além de analisar a gestão das estradas apresenta também soluções alternativas de investimento, tentando apresentar, sempre que possível, a relação custo-benefício de cada solução. (Santos, 2013).

Embora haja todos estes métodos de avaliação, ainda existem muitos países em que esta avaliação não é feita, pelo menos de forma metódica. Por exemplo, no Brasil, que embora tenha 90% de estradas não pavimentadas em toda a sua rede rodoviária, não existe metodologia para avaliar as condições destas estradas. No Brasil apenas existem manuais como o Manual Técnico de Conservação e Recuperação de Estradas Vicinais de Terra e uma publicação do DNER, Conservação de Estradas Não-Pavimentadas (1981) que auxiliam os municípios (Santos, 2013), que são os responsáveis pela construção, manutenção, recuperação e reconstrução destas estradas. Os municípios como muitas vezes não têm pessoal técnico especializado para a execução destas tarefas, permitem que vários procedimentos técnicos sejam mal usados (Ferreira, 2007).

2.6 Aspetos económicos

A avaliação económica mede o benefício económico de investimentos alternativos e soluções de manutenção, que dizem respeito a alternativas de projeto, por forma a assegurar uma distribuição ótima de recursos (Archondo-Callao, 2004). Em Portugal, existem muitas estradas com problemas de segurança e de conservação. Desta forma, é necessária a realização de trabalhos de conservação e de reabilitação para estas estradas (Ferreira, 2014).

2.6.1 Níveis de qualidade da estrada

Os níveis de qualidade que a estrada oferece, são caracterizados pelo tipo de superfície, pela qualidade de acesso da estrada e pela qualidade de viagem/comodidade. Em Portugal, os utentes preocupam-se, cada vez mais, com a segurança e a qualidade das estradas em que circulam (Ferreira, 2014). O Quadro 2.6 relaciona o nível de qualidade da estrada com as qualidades de acesso da estrada e da viagem a que os utentes estão sujeitos. Conclui-se, através da análise do quadro, que à medida que o nível de qualidade da estrada aumenta, a qualidade de acesso da

estrada também aumenta, bem como a qualidade da viagem, uma vez que a rugosidade diminui. Esta qualidade de viagem, ou seja, se a viagem é feita comodamente, é medida através da rugosidade que a estrada apresenta, ou seja, através das irregularidades. Percebe-se através do Quadro 2.6 que a rugosidade, até determinada qualidade da estrada, varia consoante a estação, ou seja, na estação húmida a rugosidade é maior que na estação seca. Isto acontece, uma vez que na estação húmida, com a saturação do solo, este fica menos resistente, e mais deformável, sendo por vezes quase impossível a circulação de veículos por estes solos.

Quadro 2.6 – Níveis de qualidade de estradas analíticos para estradas pavimentadas e não pavimentadas (adaptado de Archando-Callao, 2004)

Nível de qualidade da estrada	**Qualidade de acesso da estrada**				**Qualidade da viagem**	
	Estação seca		**Estação húmida**		**Rugosidade**	
	V.** de 4 rodas**	**V. de 2 rodas**	**V.de 4 rodas**	**V. de 2 rodas**	**Estação Seca**	**Estação Húmida**
N. pav.* com acesso não confiável	Não confiável	Não confiável	Não confiável	Não confiável	N.A.***	N.A.
N. pav. muito pobre	Normal	Difícil	Difícil	Difícil	22,0	25,0
N. pav. pobre	Normal	Normal	Difícil	Difícil	17,0	25,0
N. pav. razoável	Normal	Normal	Normal	Difícil	13,0	22,0
N.pav. boa	Normal	Normal	Normal	Normal	10,0	10,0
N.pav. muito boa	Normal	Normal	Normal	Normal	7,0	7,0
Pav.** muito pobre	Normal	Normal	Normal	Normal	12,0	12,0
Pav. pobre	Normal	Normal	Normal	Normal	8,0	8,0
Pav. razoável	Normal	Normal	Normal	Normal	4,0	4,0
Pav. boa	Normal	Normal	Normal	Normal	3,0	3,0
Pav. muito boa	Normal	Normal	Normal	Normal	2,0	2,0

* Não Pavimentada; ** Pavimentada; *** Não Aplicável; **** Veículo

A rugosidade da estrada afeta a circulação de veículos, o desgaste dos veículos e as manobras dos veículos, e pode ser quantificada através do índice *Present Serviceability Rating* (PSR) (falado em 2.5) ou pelo *International Roughness Index* (IRI). Através da Figura 2.4 conclui-se que é possível diminuir os custos operacionais dos veículos reduzindo a rugosidade das estradas não pavimentadas, o que é uma vantagem para os utentes da estrada. O custo de melhorar as condições operacionais, por melhoria na fase de construção, como o uso de melhores materiais,

melhor compactação, melhor drenagem, etc., e melhor manutenção depende e está a cargo das autoridades rodoviárias ou dos proprietários das estradas. Em Portugal, das autoridades rodoviárias fazem parte os administradores rodoviários, responsáveis por instituições como o Instituto das Infraestruturas Rodoviárias – I. P. (InIR), e os operadores rodoviários responsáveis por instituições como Infraestruturas de Portugal. ou Brisa – Auto-estradas de Portugal S.A.. (Ferreira, 2014).

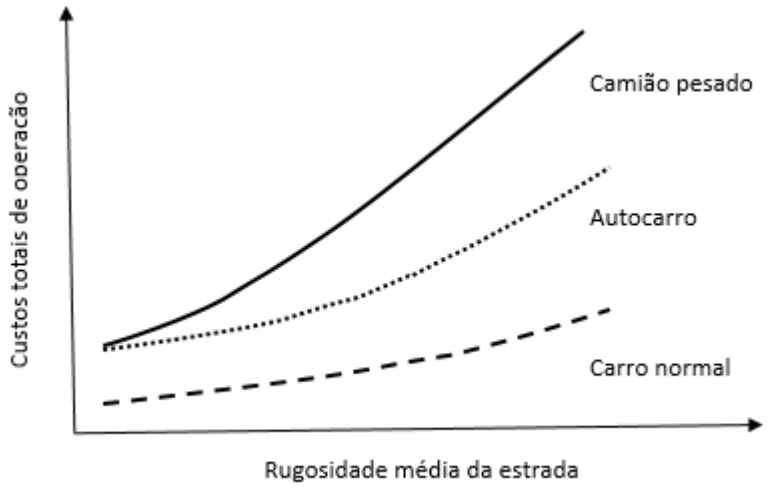


Figura 2.4 - Relação entre a rugosidade média da estrada e o total de custos operacionais de veículos (adaptado de DOT, 1990).

2.6.2 Custos dos utilizadores da estrada e das autoridades rodoviárias

Este ponto está relacionado com os custos relativos aos utentes da estrada e às autoridades rodoviárias. O Quadro 2.7 apresenta as velocidades dos veículos, os custos de operação de veículos (VOC), e os custos dos utilizadores da estrada (RUC), e as suas relações com a qualidade da estrada e com as estações seca e húmida. Conclui-se pela análise do Quadro 2.7 que, com o aumento da qualidade do tipo de estrada (pavimentada e não pavimentada) a velocidade a que os veículos podem circular aumenta, e os custos associados aos diminuem.

Através do Quadro 2.8 pode-se observar os custos de manutenção para manter o nível de qualidade da estrada.

Quadro 2.7 – Velocidades dos veículos, VOC e RUC, para estação seca e estação húmida (Archando-Callao, 2004)

Nível de qualidade da estrada	**Estação Seca**			**Estação Húmida**		
	Velocidade (km/h)	**VOC ($***/km)**	**RUC ($/km)**	**Velocidade (km/h)**	**VOC ($/km)**	**RUC ($/km)**
N. pav.* muito pobre	28	0,515	0,624	25	0,560	0,684
N. pav. pobre	37	0,439	0,523	25	0,560	0,684
N. pav. razoável	48	0,375	0,441	28	0,515	0,624
N. pav. em boas condições	61	0,330	0,381	61	0,330	0,381
N. pav. em muito boas condições	78	0,288	0,328	78	0,288	0,328
Pav.** muito pobre	52	0,360	0,420	52	0,360	0,420
Pav.pobre	72	0,301	0,345	72	0,301	0,345
Pav. razoável	84	0,247	0,284	84	0,247	0,284
Pav. boa	85	0,234	0,271	85	0,234	0,271
Pav.muito boa	85	0,230	0,267	85	0,230	0,267

*Não Pavimentada; ** Pavimentada; *** Dólares americanos

Quadro 2.8 – Custos de investimento de manutenção do nível de qualidade de uma estrada (×1000$***/km) (Archando-Callao, 2004)

De nível de qualidade de estrada	**Para** nível de qualidade de estrada					
	Não pavimentada pobre	Não pavimentada razoável	Não pavimentada boa	Não pavimentada muito boa	Pavimentada razoável	Pavimentada boa
N. pav.* muito pobre	5	10	30	95	155	255
N.pav. pobre		5	25	90	150	220
N.pav. razoável			20	85	145	215
N. pav. boa				65	125	195
N. pav. muito boa					60	130
Pav.* razoável						70

*Não Pavimentada; **Pavimentada; ***Dólares americanos

2.6.3 Alternativa-zero e análise sensitiva

Este ponto é o ponto fulcral numa avaliação económica de uma estrada. A avaliação económica passa também por definir a alternativa de não executar nenhum projeto de construção ou manutenção, ou seja, alternativa zero, ou cenário mínimo, que é função do tráfego e da importância da estrada. Através disto é possível ter noção se vale a pena, em termos económicos, melhorar ou não a qualidade da estrada. Através da análise sensitiva é possível saber como é que os resultados são influenciados pelas projeções de tráfego, pelos custos para a autoridade rodoviária e pelos custos dos utentes. Para obter resultados específicos de cada país, esta metodologia deve ser feita, adaptando os dados referentes ao país em causa (Archando-Callao, 2004).

2.7 Reforço de estradas não pavimentadas

Nas estradas não pavimentadas o usual é a utilização de solos ou cascalhos para a sua construção, mas também podem ser utilizados outras soluções como a inclusão de ramos, troncos ou geossintéticos. A utilização destas soluções dependerá da localização da estrada ou da necessidade de melhoramento da fundação (Santos, 2013).

Quando as estradas não pavimentadas se encontram construídas sobre uma fundação pobre, podem ocorrer grandes deformações, o que pode levar, por sua vez, a custos adicionais de manutenção ou até mesmo à interrupção do tráfego em más condições. O uso de geossintéticos para reforço deste tipo de solos flexíveis tem-se tornado uma tecnologia viável. Este tipo de reforço permite um aumento dos anos de vida destas estradas e permite reduzir a espessura da camada de base sem alterar a resistência destas às mesmas repetições de cargas (Subaida et al., 2009).

2.7.1 Geossintéticos

Os geossintéticos são definidos como " produtos industrializados poliméricos (sintéticos ou naturais), cujas propriedades contribuem para melhorias geotécnicas, nas quais eles desempenham principalmente funções de: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, controle de fluxo (impermeabilização) e controle superficial" (Vidal, 2002). Atualmente, os geossintéticos mais utilizados no reforço de estradas não pavimentadas são os geotêxteis tecidos, não tecidos e as geogrelhas. A colocação deste tipo de reforço ajuda a obter uma plataforma mais resistente e menos deformável. Para além disso, a capacidade de reforço do geossintético pode permitir a utilização de um material de aterro de qualidade inferior, o que poderá trazer não só benefícios a nível económico mas também a nível ambiental (Góngora, 2011).

No Quadro 2.9 estão apresentadas as diversas funções associadas a cada tipo de geossintético.

Quadro 2.9 – As principais funções de cada tipo de geossintético (adaptado de Barbosa, 2010)

Tipo de geossintético	**Funções Características**					
	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

As geogrelhas são um tipo de reforço muito utilizado em estruturas que assentam sobre solos frágeis. Este tipo de reforço tem muitos benefícios, comparativamente às práticas convencionais seguintes (Archer, 2008):

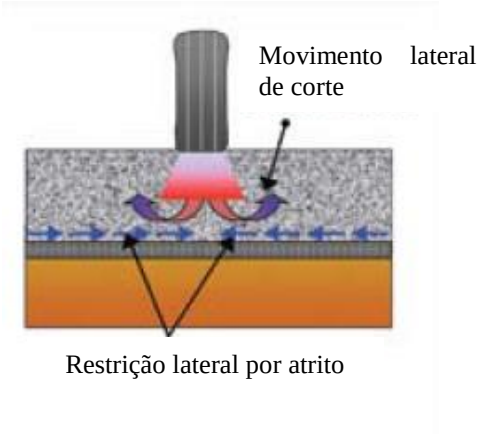
- Escavações e substituição com material de aterro selecionado;
- Usar grandes espessuras de pavimento para reforçar subsolos com fracas características;
- Estabilização química ou modificação com materiais baseados em cálcio (por exemplo, o cimento);
- Estabilização com geotêxteis.

Ao reduzir a espessura da camada granular em 50%, com a utilização deste tipo de reforço, o empreiteiro pode conseguir reduções de custos significativas e ainda reduzir em 50% as emissões de CO_2 durante a construção (TIL, 2012). Para além destas vantagens, o uso de geogrelhas, relativamente a técnicas de melhoramento e reforço como escavações, troca de materiais e de estabilização com troncos de árvores, mostra ser uma solução, em termos de processo construtivo, muito mais rápida e mais eficaz pois permite a compactação de materiais sobre fundações moles. Desta forma, todas estas vantagens tornam este tipo de reforço muito aliciante em termos ambientais, uma vez que, não permite o abate de árvores para a estabilização de solos moles, permite a redução das espessuras das camadas granulares, e ainda permite uma diminuição no uso de equipamentos de transporte, nivelação e de compactação dos materiais, que permite a tal diminuição das emissões de CO_2 (nem sempre serão 50% de redução, mas poderá chegar a esse valor) (Centurión et al., 2005).

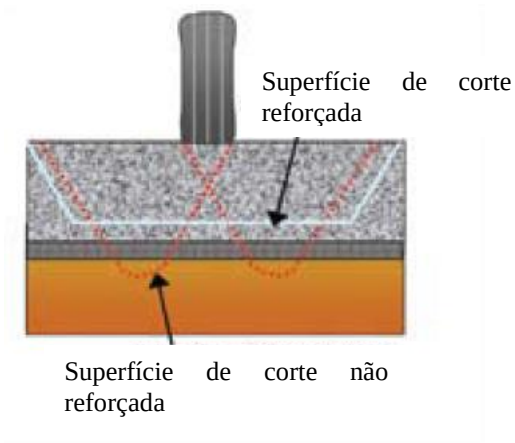
A geogrelha apresenta uma estrutura em forma de grelha, que normalmente é composta por polietileno de alta densidade (PEAD), poliéster (PET) ou polipropileno (PP). Este material

apresenta baixa deformabilidade e elevada resistência à tração, ou seja serve predominantemente como reforço (Vidal, 2002). Os benefícios do uso do reforço são a restrição ao movimento lateral do solo, o aumento da capacidade de suporte de carga do solo e o efeito membrana no geossintético, que estão esquematizados na Figura 2.5. Os mecanismos de restrição lateral e o efeito de membrana, trabalham em conjunto para aumentar a capacidade de suporte do solo, o que resulta num aumento da resistência à deformação e ao afundamento.

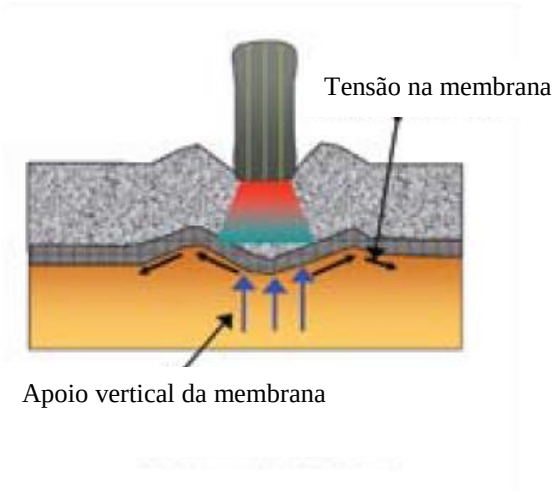
A restrição lateral ocorre devido ao atrito que existe entre o solo do aterro e a geogrelha, que acaba por restringir a movimentação lateral do solo. O tráfego gera a movimentação da camada de aterro, a qual pode ser menor com a introdução da camada de reforço. Quanto ao efeito de membrana, para este existir o geossintético deve estar deformado pela passagem de veículos, ou seja, deve ter estado submetido a elevadas deformações, pois com a ação combinada das forças de tração no reforço e a sua curvatura, é que irá ocorrer a redução da tensão vertical transferida à fundação (Góngora, 2011).



(1) – Restrição lateral



(2) – Aumento da capacidade de suporte



(3) – Efeito de membrana

Figura 2.5 - Mecanismos de reforço da geogrelha (Archer, 2008)

3 PROGRAMA LABORATORIAL: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Os solos encontrados, em redes rodoviárias, devido às suas características físico-químicas e mineralógicas, apresentam comportamentos geotécnicos muito diferenciados. Neste capítulo, são então apresentadas as características dos materiais utilizados nos ensaios laboratoriais, com o intuito de estudar o comportamento das estradas não pavimentadas relativamente ao impacto que o tráfego tem sobre as mesmas. É descrito no subcapítulo 1.2 acerca do que é abordado no presente capítulo (capitulo 3).

3.2 Materiais utilizados nos ensaios

3.2.1 Solos

Os tipos de solos utilizados ao longo do estudo laboratorial foram quatro, sendo cada um o resultado de uma mistura prévia de solos, classificados como argila, areia siltosa e areia, existentes no laboratório de geotecnia. No Quadro 3.1 estão apresentadas as percentagens de mistura dos solos referidos.

Quadro 3.1 – Tipos de solos usados nos ensaios laboratoriais

Solos ensaiados	**Características da mistura**		
	Argila	**Areia Siltosa**	**Areia**
A	-	50%	50%
B	25%	50%	25%
C	25%	75%	-
D	50%	50%	-

3.2.2 Caracterização física dos solos

Os ensaios usualmente efetuados para caracterizar os solos de utilização na construção de estradas são os seguintes: granulometria; plasticidade; compactação; capacidade de suporte; e expansibilidade (ANMP, (s.d.)). Foram por isso efetuados ensaios para a determinação da composição granulométrica (Figura 3.1), densidade de partículas solidas (G), dos limites de consistência (w_P e w_L) e ainda do valor do CBR. Através do Quadro 3.2 é possível ver os valores das propriedades calculadas para cada um dos solos.

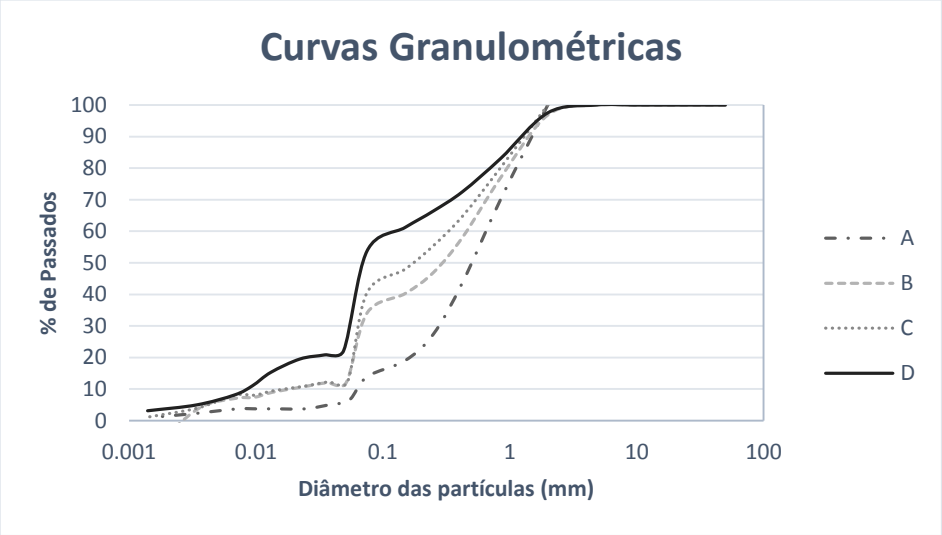


Figura 3.1 – Curvas granulométricas dos solos em estudo

Quadro 3.2 – Propriedades dos quatro solos

Solos	Densidade das partículas	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Peso específico seco máximo (kN/m^3)	Teor ótimo de humidade (%)	CBR (%)
A	2,75	-	-	19,9	8,1	6,3
B	2,76	-	-	20,6	7,6	4,4
C	2,79	-	-	20,6	8,8	3,8
D	2,78	23,2	21,6	19,6	10,2	3,5

A análise granulométrica consiste na determinação do tamanho das partículas que constituem o solo e na sua distribuição em determinados intervalos. Para este ensaio usou-se a Especificação LNEC E 196. A análise granulométrica comporta várias fases, entre elas a preparação da amostra, a peneiração grossa, a peneiração fina, com a dispersão do solo por adição do antifloculante.

Para o cálculo da densidade das partículas solidas, dos quatro tipos de solos, usou-se o procedimento descrito a norma portuguesa NP-83 (1965). Os ensaios foram todos feitos à temperatura ambiente de 20º C, e sem secagem prévia do provete, constituído pelas partículas passadas no peneiro nº4. Os valores das densidades estão representados no Quadro 3.2.

A avaliação dos limites de consistência foi efetuada de acordo com a norma portuguesa NP 143 (1969), tendo-se apenas conseguido determinar estes limites para o solo D, uma vez que é o único solo que apresenta uma percentagem de finos (argila) suficiente para que o ensaio tenha significado (50%). Este obteve um teor de humidade para o limite de liquidez de 23,2 % e para o limite de plasticidade de 21,6 %, resultando num índice de plasticidade de cerca de 2,0 que revela ser um solo pouco plástico.

A avaliação dos teores ótimos para compactação foi feita através do ensaio Proctor pesado molde pequeno segundo a especificação portuguesa E 197 (1966), tendo-se obtido as curvas de compactação apresentadas na Fig. 3.2, o que resultou nos teores de humidade indicados no Quadro 3.2.

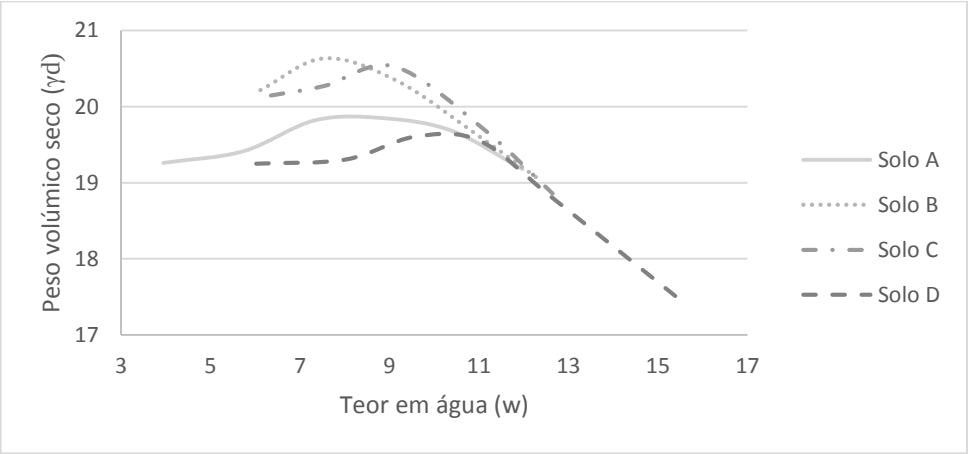


Figura 3.2 – Curvas de compactação pesada

Através da análise das curvas de compactação é possível concluir que os resultados obtidos fazem sentido. O solo A que não contém argila, ou seja é um solo granular, como é um solo bastante permeável (tem um elevado índice de vazios), é pouco sensível ao teor em água, pelo

que a sua curva de compactação não possui um pico tão pronunciado como nos outros solos. Os solos B e C já apresentam picos mais pronunciados, isto porque já possuem alguma percentagem de finos (argila), logo são mais densas tendo desta forma maior peso volúmico. O teor em água do solo B é menor que o do solo C, isto porque o solo C apresenta menor percentagem de material granular. Quanto ao solo D, este é o que apresenta maior teor de água, isto devido ao facto de apresentar 50% de argila, o que leva a uma redução do peso volúmico seco.

O CBR (California Bearing Ratio) determina o índice de suporte de um solo, isto é, mede a capacidade de suporte de um solo compactado, como explicado em 2.3.1. O CBR consiste, em termos práticos, em medir a força necessária para que um pistão normalizado penetre num solo a uma dada profundidade, com velocidade constante. Para o cálculo deste índice recorreu-se à especificação portuguesa E 198 (1967) (Quadro 3.2). Para além do cálculo do índice de suporte dos solos, também foi possível calcular a expansibilidade de cada um dos solos, através da especificação (Quadro 3.3). A partir da observação do Quadro 2.2 é possível concluir que os solos B, C e D fazem parte da classe S_1, segundo os valores de CBR obtidos, ou seja, a circulação nestes, à partida, é possível e há a possibilidade de formação de rodeiras. Quanto ao solo A, este está dentro da classe S_2, ou seja, a circulação também será possível mas agora não há a formação de rodeiras (solo deformável).
A partir da análise da Figura 3.3 e, tendo em conta o Quadro 3.4 é possível verificar que os CBR dos solos estudados nesta dissertação estão em conformidade com os CBR da Figura. Para além disso apercebemo-nos das espessuras necessárias para o pavimento, que variam entre os 35 e os 50 cm.

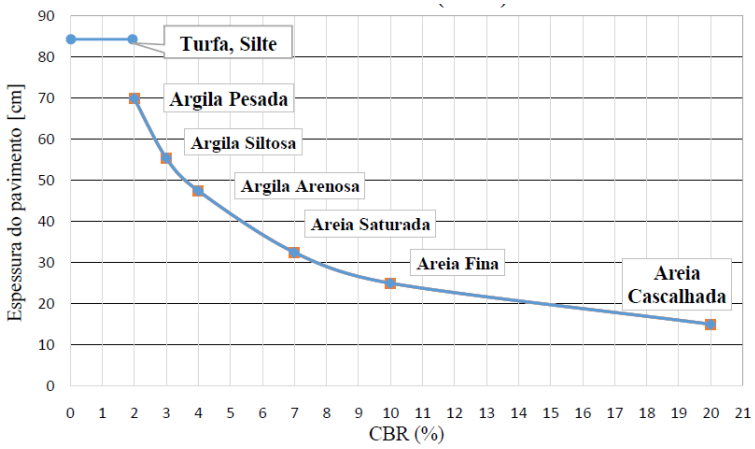


Figura 3.3 – Influência do CBR (%) e do material de aterro sobre a espessura do pavimento (Paiva et al., 2015; FCE, 2004)

Quadro 3.3 – Expansibilidades dos solos

Solos	Expansibilidades (%)
A	1,04
B	1,21
C	3,05
D	3,29

Perante os resultados dos ensaios efetuados pode-se proceder à identificação e classificação dos solos. Identificar e classificar os solos são trabalhos essenciais em quase todos os estudos geotécnicos, incluindo obras de estrada. Assim, de acordo com a classificação granulométrica (Triângulo de Feret) e classificação unificada de solos (ASTM d 2487-85) em que já entram os limites de Atterberg, os solos A, B, C e D apresentam a classificação representada no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Classificação de cada solo segundo o Triângulo de Feret e a classificação ASTM

Solos	Triângulo de Feret	ASTM
A	Areia	Areia siltosa
B	Areia siltosa	Areia siltosa
C	Areia siltosa	Areia siltosa
D	Areia siltosa	Silte Arenoso

Também se classificaram estes solos segundo uma classificação usada na área de estradas, a AASHO – American Association State Higway Officials, obtendo-se as classificações presentes no Quadro 3.5. Esta classificação fundamenta-se na granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade dos solos.

Quadro 3.5 – Classificação dos solos segundo a classificação AASHO

Solos	AASHO	
A	A1b	Solo granular sem finos
B	A2-4	Solo granular com finos siltosos de baixa compressibilidade
C	A4	Solos siltosos com pequena quantidade de material grosso e de argila (baixa compressibilidade LL < 40%)
D	A4	Solos siltosos com pequena quantidade de material grosso e de argila (baixa compressibilidade LL < 40%)

3.2.3 Geogrelha

Neste trabalho utilizou-se uma geogrelha como elemento de reforço dos solos. Esta geogrelha é feita de um polietileno transparente, do tipo Secugrid 200/40 R6 (Fig. 3.3) com um tamanho de abertura de aproximadamente 71×25 (mm). No Quadro 3.5 são apresentadas as propriedades da geogrelha fornecida pelo fabricante. Para o presente trabalho foi necessário o corte da geogrelha num "pedaço" de 375 mm × 305 mm (sentido longitudinal da caixa; Figura 3.3 (2)) e num "pedaço" de 305 mm × 375 mm (sentido transversal da caixa; Figura 3.3 (1)).

(1) (2)

Figura 3.4 - Geogrelha utilizada nos ensaios de pista (nestas imagens também é a visível a esponja por baixo da geogrelha); (1) – Geogrelha colocada no sentido transversal à caixa de ensaios; (2) - Geogrelha colocada no sentido transversal à caixa de ensaios

Quadro 3.6 - Propriedades da geogrelha

Propriedades	Valor
Abertura (mm × mm)	71 × 25
Resistência à tração (kN/m)	40
Resistência à tração a 5% de deformação (kN/m)	140

3.2.4 Esponja

Neste trabalho também foi usada uma esponja para os ensaios de pista, com 375 mm×305 mm e com 11,05 (mm) de espessura (Fig. 3.4), ou seja, com a mesma dimensão da caixa de ensaios. A esponja, colocada na caixa por baixo do solo, serve para simular a existência de um solo fraco e deformável por baixo da camada de desgaste da estrada não pavimentada. Para caracterizar a esponja em termos de deformabilidade, foi sujeita a carregamento e descarregamento (Figura 3.5). Concluiu-se (Figura 3.7) que quando a esponja é sujeita a uma carga de 80 kg esta apresenta uma deformação de cerca de 5 mm, e que apresenta muito boa recuperação quando é retirada a carga e recuperação total após 1 minuto de espera sem carga.

É de referir o facto de esta esponja não simular na perfeição a fundação instável, pois não tem uma espessura suficiente para tal. Não foi possível usar uma esponja com maior espessura pois a caixa de ensaios não era suficientemente grande para isso, ou seja, ficávamos com camadas de solo muito mais pequenas, o que comprometeria os ensaios. Também muito importante é o facto da recuperação da esponja ser bastante boa, o que em terreno não acontece na totalidade.

Figura 3.5 – Esponja usada nos ensaios de pista

Figura 3.6 – Ensaio de deformação/recuperação da esponja

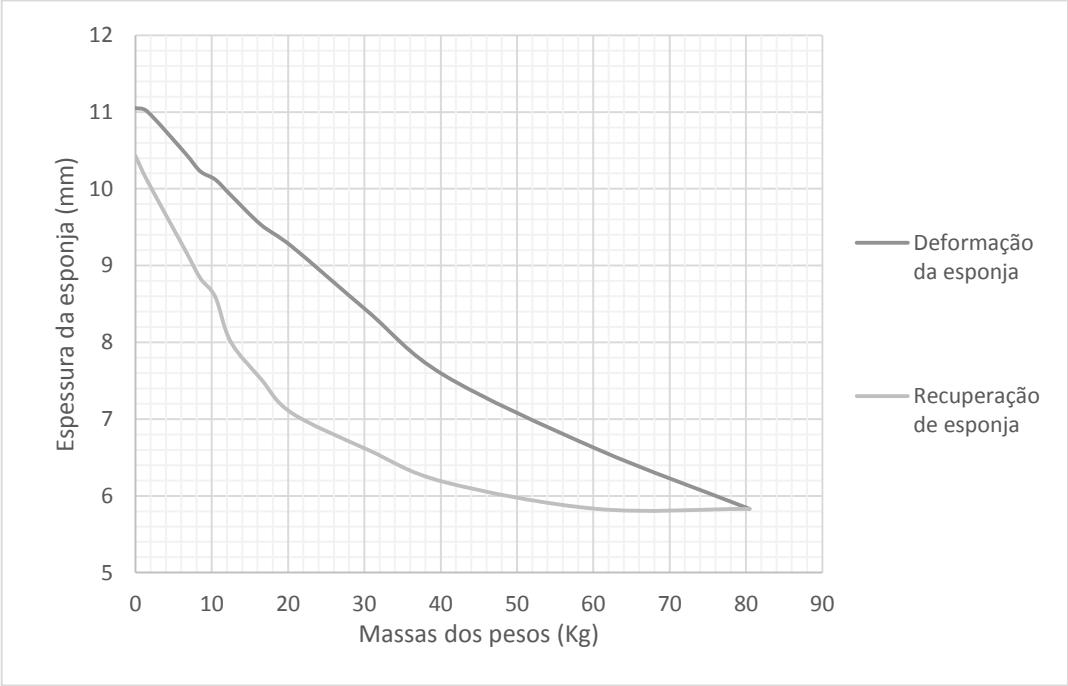


Figura 3.7 – Deformação e recuperação da esponja quando sujeita a carregamentos

3.3 Equipamento utilizado nos ensaios

3.3.1 Caixa de ensaios

Para efeito dos ensaios de pista foi necessária a construção de uma caixa metálica para a colocação do solo a ser ensaiado (Figura 3.8). Esta tem 375mm×305mm com bordo de 98 mm de altura.

Figura 3.8 – Caixa de ensaios para acondicionamento do solo durante os ensaios

3.3.2 Prensa hidráulica para compactação

A compactação foi feita através de uma prensa hidráulica SERVOSIS Modelo ME-402E, nº de série 140, ano 2000, com capacidade de 20 toneladas (Figura 3.9). A compactação teve que ser feita nesta prensa para facilitar a compactação, pois caso não fosse feita desta forma, teríamos que recorrer à compactação manual (Proctor) o que daria cerca de 4270 pancadas por amostra com o pilão pesado.

(1)

(2)

Figura 3.9 – (1) – Prensa hidráulica usada para densificar o solo na caixa de ensaio; (2) – Software da prensa usado para controlar as tensões exercidas

3.3.3 Prensa para ensaio de CBR

A prensa usada nos ensaios de CBR foi a Tecnotest do tipo B005-P, nº 122.86.003 (Figura 3.10). Foram feitos três ensaios CBR para cada um dos solos, perfazendo um total de doze ensaios CBR. Esta prensa teve que ser ajustada para a velocidade de 1 mm/min de deformação, que é o que a norma pede, uma vez que a prensa é usada maioritariamente para outro tipo de ensaios.

(1) (2)

Figura 3.10 – (1) – Prensa usada para os ensaios de CBR; (2) – emersão de um molde usado para um dos CBR

3.3.4 Máquina Wheel Tracking

O equipamento para o ensaio de pista é composto pelo máquina Wheel Tracking e o seu software (Figura 3.11). A câmara de acondicionamento dos provetes está ilustrada na Fig. 3.12. Este equipamento permite obter os resultados da deformação da amostra com a passagem de uma roda, que faz parte da máquina (Figura 3.12). Os resultados são fornecidos pelo software do equipamento. O limite de ciclos de passagem da roda, nestes ensaios, é de 10000, sendo este limite de deformação de 20 mm. Estes limites foram atribuídos para solos utilizados sob pavimentos betuminosos.

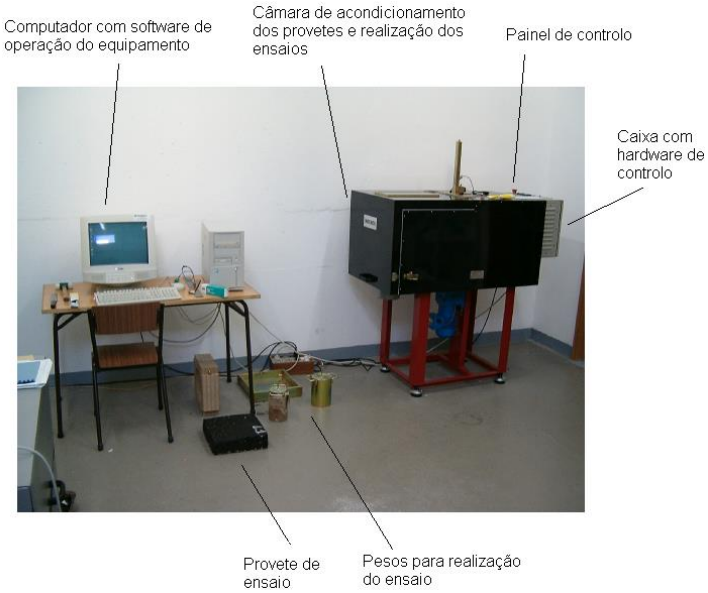


Figura 3.11 – Esquema do equipamento Wessex S867

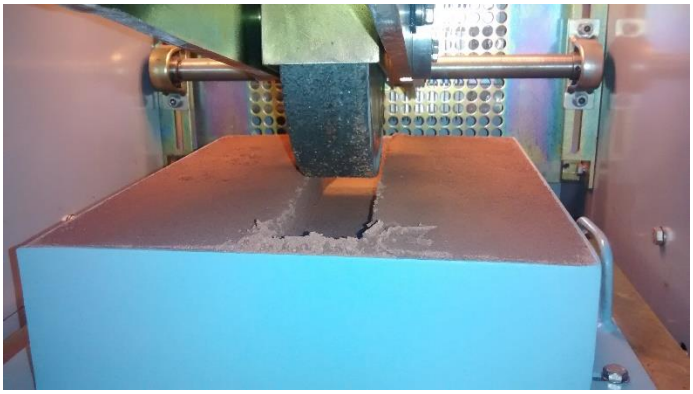


Figura 3.12 – Imagem do interior da câmara de acondicionamento dos provetes e realização de ensaios

3.4 Metodologia de ensaio

3.4.1 Preparação dos provetes

Uma vez que o objetivo da dissertação é saber como é que se comporta uma estrada não pavimentada em situações de reforço, de não reforço e sobre solos fracos, decidiu-se fazer a compactação das amostras para os teores ótimos, para assim se conseguir uma melhor compactação, porque é assim que deve ser feito na construção da estrada.

Após o cálculo da quantidade de solo a utilizar em cada ensaio e da quantidade de água a adicionar-lhe, procedeu-se à pesagem e posterior homogeneização solo-água. Seguidamente, procedeu-se à sua compactação em três camadas.

Por forma a reproduzir o mais corretamente a energia utilizada no proctor, decidiu-se fazer a densificação por 3 camadas, cada uma com cerca de 3 cm de espessura, onde cada camada foi sujeita a uma força de compressão de 10 kN (Figura 3.13). Este foi calculado a partir da energia resultante do ensaio proctor. Foi feita a conversão da energia do proctor para a energia a ser usada no nosso provete, que apresentava uma área maior que o molde do proctor.

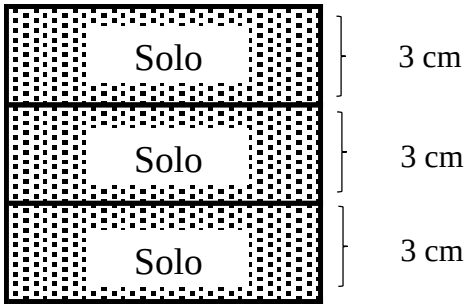


Figura 3.13 – Esquema da compactação dos solos A, B, C e D.

3.4.2 Plano de Ensaios

Neste trabalho foram realizados vinte ensaios de pista. Cada um dos ensaios foi sujeito a 3000 ciclos de carga, com as diversas configurações apresentadas no Quadro 3. 6. Para os ensaios de pista usaram-se, em dezasseis dos vinte ensaios as amostras com os teores ótimos de água. Em quatro ensaios decidiu-se secar as amostras após a compactação, para simular situações de seca. Também se tinha pensado fazer a saturação das amostras após a compactação para simular situações de cheias, mas tal não foi possível, pois o equipamento de ensaios de pista não está preparado para esse tipo de ensaios. Era provável haver transbordo de água podendo colocar em risco o bom funcionamento do equipamento.
Em quatro dos vinte ensaios utilizou-se esponja como fundação (Figura 3.14 (1)), por forma a simular a existência de um solo fraco e deformável por baixo da camada de desgaste da estrada não pavimentada. Nos oito ensaios com a geogrelha, esta foi colocada entre a esponja e o solo (Figura 3.14 (2)), para atuar como reforço. Também se decidiu ensaiar com a geogrelha nas direções longitudinal e transversal, para assim saber se há diferenças em termos de reforço e se houver, qual o melhor sentido de colocação.

Quadro 3.7 - Ensaios realizados

Ensaio	Solo com teor ótimo	Solo seca	Esponja	Reforço	Sentido do Reforço
1	A	-	-	-	-
2	B	-	-	-	-
3	C	-	-	-	-
4	D	-	-	-	-
5	-	A	-	-	-
6	-	B	-	-	-
7	-	C	-	-	-
8	-	D	-	-	-
9	A	-	✓	-	-
10	B	-	✓	-	-
11	C	-	✓	-	-
12	D	-	✓	-	-
13	A	-	✓	✓	Longitudinal
14	A	-	✓	✓	Transversal
15	B	-	✓	✓	Longitudinal
16	B	-	✓	✓	Transversal
17	C	-	✓	✓	Longitudinal
18	C	-	✓	✓	Transversal
19	D	-	✓	✓	Longitudinal
20	D	-	✓	✓	Transversal

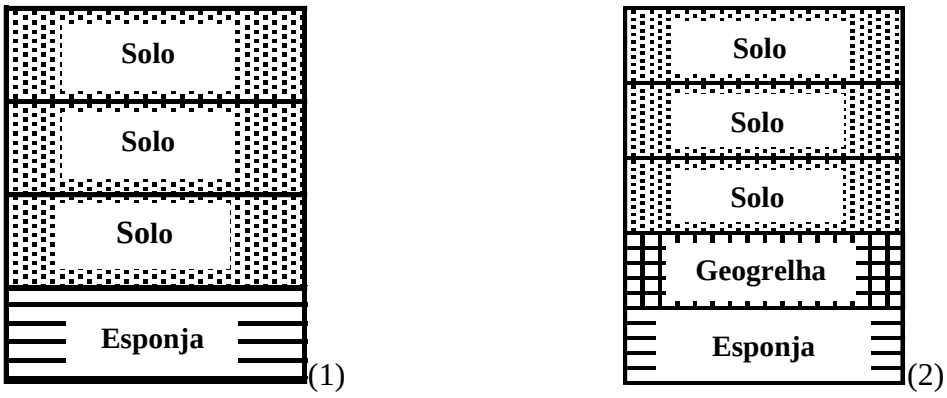


Figura 3.14 - Esquemas de compactação com esponja e solo com teor ótimo (1) e com esponja e geogrelha (2)

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Introdução

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos para as várias configurações dos ensaios realizados e as suas respetivas análises.

A primeira análise diz respeito ao tipo de solo utilizado como material de aterro, ou seja, que tipo de solo, dentro dos quatro tipos estudados, é o mais aconselhável a ser usado por forma a tornar a estrada o mais resistente e circulável possível.

Na segunda análise, observa-se o comportamento da estrada construída com cada um dos quatro solos após a sua seca, por forma a saber qual o solo que se adapta melhor às condições de secagem, e se esta acaba por ter um efeito positivo ou negativo sobre o comportamento dos vários solos.

A terceira análise passa por estudar o comportamento das estradas quando estão construídas sobre uma fundação instável, ou seja, propícia a grandes deformações. Para a simulação da fundação instável colocou-se, na base do molde, um material esponjoso.

A quarta e última análise diz respeito ao comportamento após a colocação de uma geogrelha sobre a fundação instável, ou seja, sobre a esponja. Para tal, analisou-se a melhoria que houve com geogrelha por comparação com os resultados sem geogrelha. Comparou-se ainda, a colocação da geogrelha nos sentidos longitudinal (comprimento da caixa de ensaio) e transversal ao sentido transversal (largura da caixa de ensaio), por forma a estudar a melhor orientação de colocação.

4.2 Influência do tipo de solo

Neste ponto pretendeu-se comparar o comportamento da estrada perante os diferentes tipos de solo, com os seus respetivos teores ótimos de humidade, sem nenhum tipo de reforço. A Figura 4.1 mostra as deformações superficiais que cada solo sofreu ao longo dos 3000 ciclos que durou o ensaio. Observa-se que o solo A, que é o solo que não contém argila, ou seja, que não tem

qualquer tipo de material ligante que permita a formação da agregação do solo, foi o solo que sofreu mais deformação (cerca de 13 mm). Em oposição, o solo D, que contém mais percentagem de argila, acabou por ser a amostra a sofrer a menor deformação (1,5 mm) devido à melhor agregação do solo. A partir da Figura 4.2 é possível confirmar esta grande diferença de deformações entre os dois solos (A e D). Quanto aos solos B e C, como são os solos que apresentam as percentagens intermédias, quer de argila quer de areias, também são os que apresentam valores intermédios de deformação (4,11 mm para o solo B e 2,06 mm para o solo C). Para além disto, os solos B e C embora sejam muito parecidos em termos granulométricos, apresentando a mesma classificação, em termos de comportamento de deformabilidade os valores já não são tão próximos. Pode-se, desta forma concluir que mesmo pequenas percentagens a mais de argila presentes num solo têm uma grande influência na sua deformabilidade. Tendo em consideração estes resultados, foi possível concluir que os solos D e C são os melhores solos, em termos de composição granulométrica, visto que foram os que sofreram menos estragos (deformação) aquando a passagem da roda.

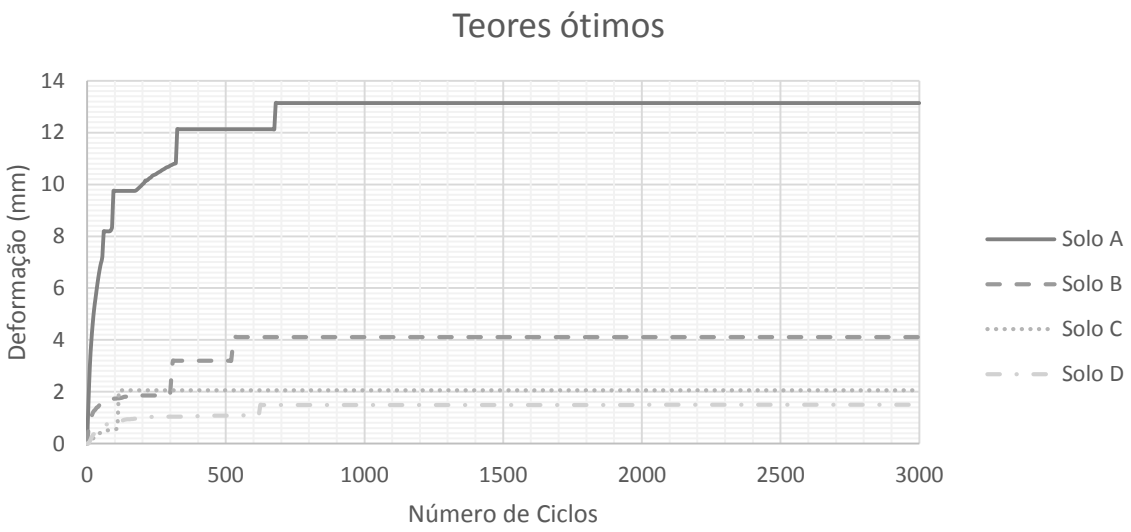


Figura 4.1 – Deformação superficial nos ensaios não reforçados com os teores ótimos de humidade

(1) (2)

Figura 4.2 – Deformação superficial dos solos A (1) e D (2)

4.3 Influência da secagem

Também foram feitos ensaios para os solos após as suas devidas secagens, por forma a simular épocas de seca ou climas secos. Em termos de comparação entre tipos de solo, concluiu-se, mais uma vez, que o solo A é o pior solo, apresentando uma deformação de 3,28 mm, e que o solo D é o que se comporta melhor, com uma deformação nula (Figura 4.3). Como referido no capítulo da revisão bibliográfica, mais precisamente no subcapítulo 2.2.2, os solos em épocas de seca, comportam-se pior caso não possuam material ligante, como a argila e, pelo contrário, comportam-se melhor quando têm mais material ligante que confere ao solo uma maior agregação das partículas. Ou seja, os resultados do ensaio estão conforme o que seria de esperar.

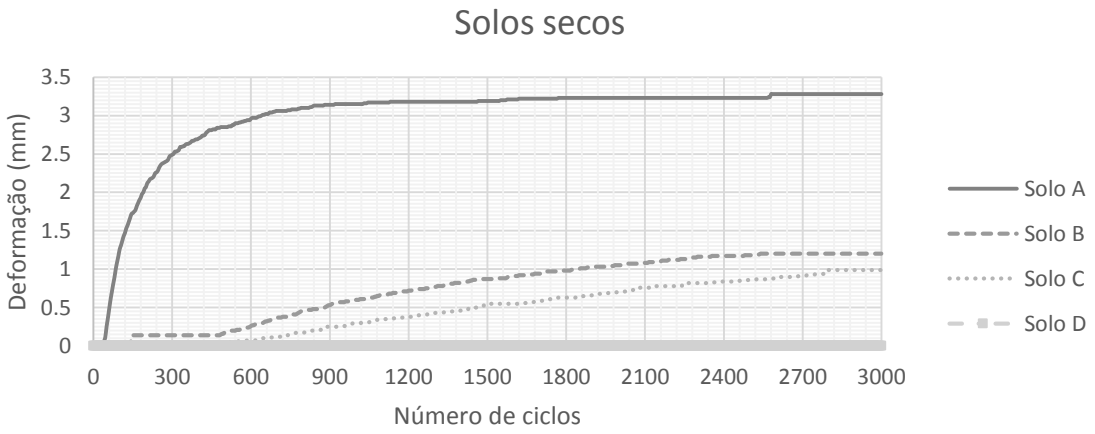


Figura 4.3 – Deformação superficial das amostras secas sem reforço

Através da Figura 4.4 e do Quadro 4.1 conclui-se que houve uma melhoria acentuada na resistência dos solos quando sujeitos a secagem. Tal pode ser explicado pelo simples facto de à medida que os solos foram perdendo água, os espaços que outrora estavam preenchidos com água, agora já não estão. Desta forma, houve menos probabilidade de as partículas deslizarem entre si à passagem da roda. Ou seja, após secagem, os solos ficaram mais rígidos, o que se traduziu no aumento das suas resistências à passagem da roda pela superfície dos mesmos (Figura 4.5). Como as partículas duma argila se agrupam melhor, ficam mais próximas umas das outras, tornando o solo mais resistente. Assim é possível explicar o porquê do solo D, que é o que apresenta maior quantidade de argila, ser o que tem menor deformação. Como é do conhecimento geral, as estradas no seu estado seco são muito mais transitáveis, seguras e têm menor probabilidade de deformação. A única desvantagem associada a este tipo de situação é a formação de poeiras à passagem de veículos, que neste caso ocorreria mais no solo D, como explicado em 2.4. Através da Figura 4.4 e do Quadro 4.1 conclui-se que os solos que apresentaram uma maior melhoria foram os D, A e B, por ordem decrescente de qualidade, embora a deformação no solo A tenha sido a mais elevada. Decidiu-se colocar os resultados da Figura 4.4 até os 1500 ciclos para as diferenças entre resultados serem mais percetíveis.

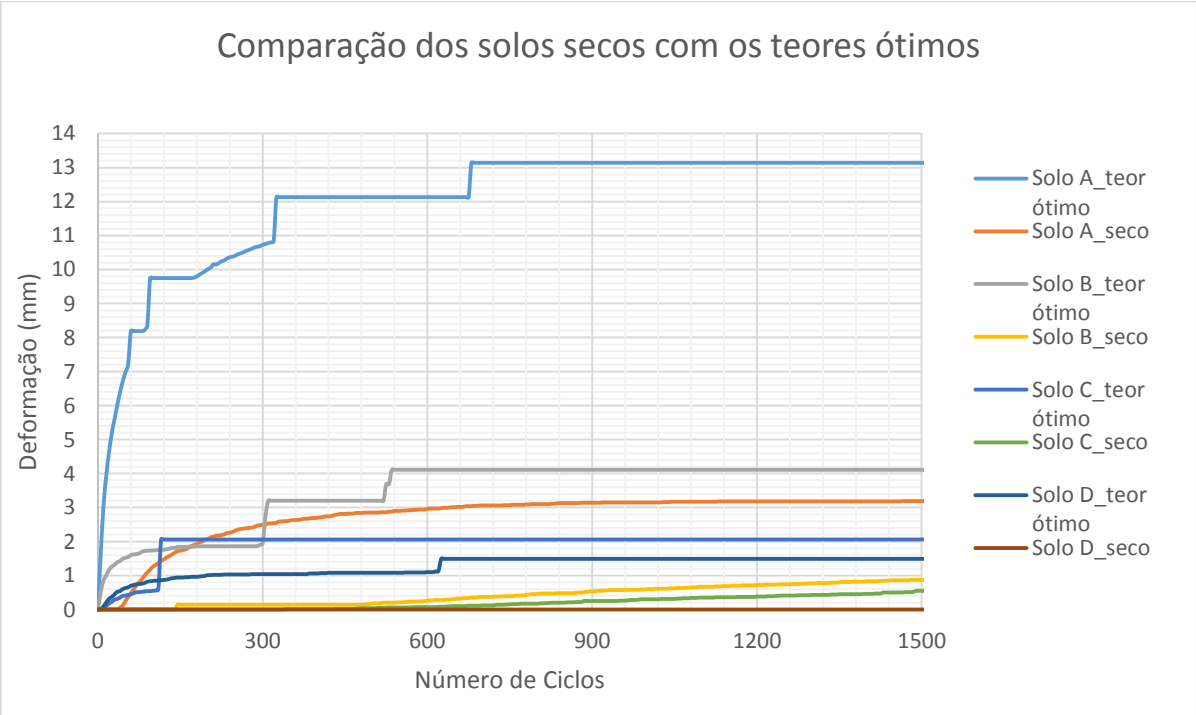


Figura 4.4 – Comparação das deformação dos solos secos e com os teores ótimos

Quadro 4.1 – Melhorias (%) obtidas em cada tipo de solo após secagem dos mesmos.

Solos	Deformações (mm)		Melhorias (%)
	Teores ótimos	Secos	
A	13,14	3,28	75 %
B	4,11	1,20	71 %
C	2,06	0,99	52 %
D	1,50	0,00	100 %

Através da Figura 4.5, percebe-se que, de facto, a deformação dos solos foi pequena após secagem, mesmo no solo A, que foi aquele que teve maior deformação (1). Mesmo assim, é percetível a diferença entre as deformações do solo A e do solo D, que são os extremos em termos de deformação.

(1) (2)

Figura 4.5 – Aspeto da plataforma após ensaio com solo A (1) e solo D (2)

4.4 Influência da esponja

Nesta seção pretende-se analisar o comportamento dos solos com a colocação da esponja no fundo da caixa de ensaios, ou seja, como fundação da plataforma. A colocação da esponja,

como já anteriormente referido, teve como intuito a simulação de uma fundação instável, o que, na realidade, é um cenário bastante comum, principalmente em países tropicais onde, para agravar ainda mais a situação, a percentagem de estradas não pavimentadas é significativa (Quadro 2.1). Era de esperar que todos os solos se comportassem pior com a colocação da esponja do que na sua ausência. O que acontece nos ensaios com a inserção da esponja é que, apesar dela ter um comportamento de recuperação (volta para cima), o solo deslocado não volta ao centro acabando por fissurar mais facilmente nos ciclos seguintes, pois continua a haver deslocação de solo para os lados ao longo dos ciclos. Era também de prever que o solo A seria o solo com pior comportamento, uma vez que apresenta uma percentagem muito reduzida de fino e portanto reduzida agregação do solo. De facto, nos ensaios realizados, confirmou-se o esperado, como mostram os resultados apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7. Como é percetível através da Figura 4.6, o solo A, ao fim de cerca de 70 ciclos, chegou à máxima deformação possível (20 mm). Através da análise à Figura 4.7, constata-se que, de facto, todos os solos tiveram um comportamento pior com a colocação da esponja, o que se traduziu num aumento da sua deformabilidade.

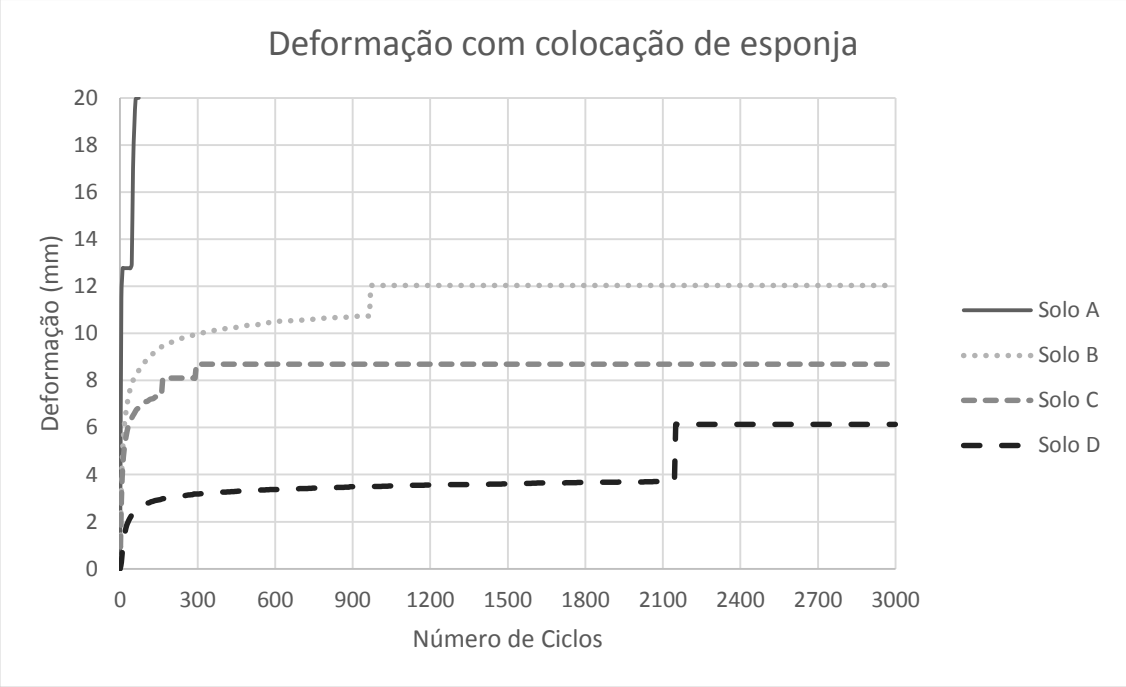


Figura 4.6 – Deformação dos solos com teores ótimos e com a colocação de esponja

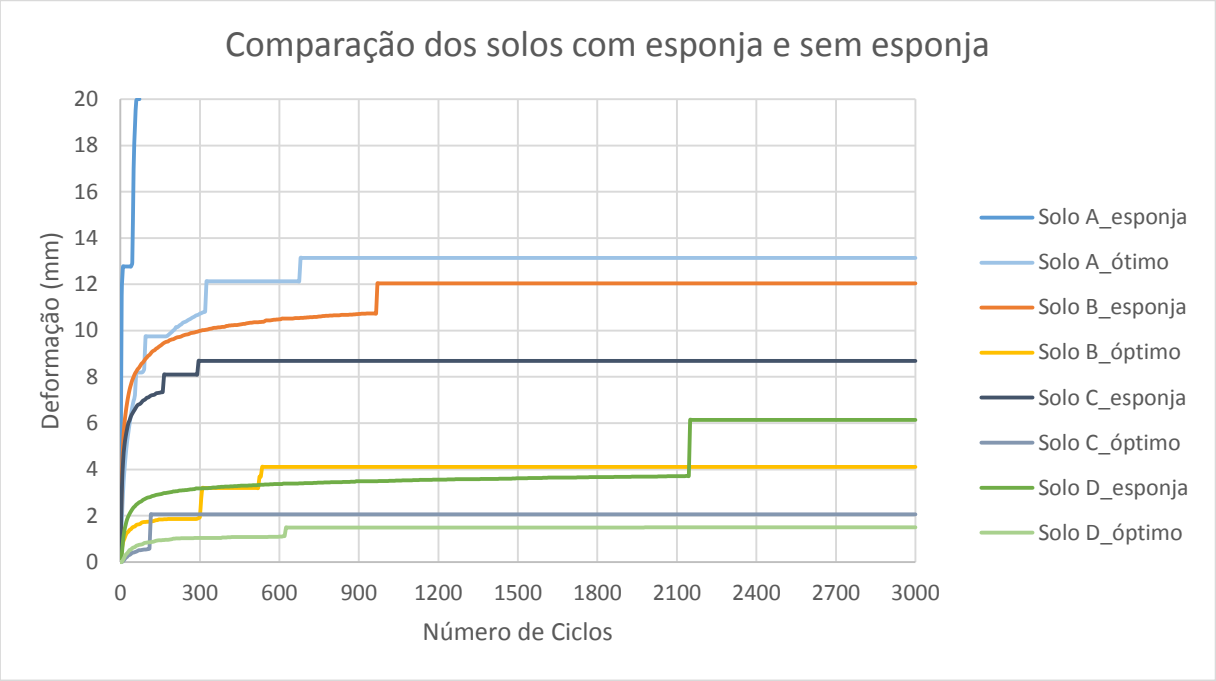


Figura 4.7 – Comparação das deformações dos solos secos com os solos quando estão com o teor ótimo

Através da observação da Figura 4.8, percebe-se o nível de estragos causados no solo A com a passagem da roda. Em (1) é percetível tanto a deformação como as fendas que se formaram aquando a passagem da roda e em (2) percebe-se que a roda ficou completamente dentro do solo, estando o braço da roda já a bater na caixa ensaios, ou seja, já não era possível conseguir naquele ensaio, uma maior deformação. De realçar que esta deformação foi conseguida apenas com 72 ciclos de passagem.

(1)

(2)

Figura 4.8 – Aspeto da plataforma após ensaio com o solo A com a colocação da esponja.

Através da análise do Quadro 4.2 é possível afirmar que os solos que sofreram menos com a colocação da esponja foram os solos A e B, em termos percentuais. Desta forma, conclui-se então, que o solo B, tendo em conta o estado do solo A como explicado acima, foi o que apresentou a menor percentagem de agravamento, embora os solos C e D apresentem uma deformação abaixo do valor de deformação do solo B.

Quadro 4.2 – Agravamento (%) dos resultados após colocação da esponja

Solos	**Deformações (mm)**		**Agravamento (%)**
	Teores ótimos	Só esponja	
A	13,4	20	35%
B	4,11	12,04	66%
C	2,06	8,69	76%
D	1,5	6,14	76%

4.5 Influência do reforço

Neste ponto pretende-se analisar o que acontece nos ensaios quando é colocado um elemento de reforço, neste caso uma geogrelha, por cima da fundação instável (esponja). É de prever que haja uma diminuição das deformações na generalidade, uma vez que se aplicou um tipo de reforço com alguma rigidez e se dificultou a deformação lateral do solo pelo atrito que este pode desenvolver com a geogrelha, além dos outros mecanismos.

4.5.1 Influência da geogrelha no sentido longitudinal à caixa de ensaios

Neste ponto, analisa-se o comportamento dos solos, quando foi colocada a geogrelha no sentido do comprimento da caixa de ensaios, ou seja, com maior resistência de tração no sentido longitudinal da estrada. Os resultados obtidos para estes ensaios são os apresentados na Figura 4.9.

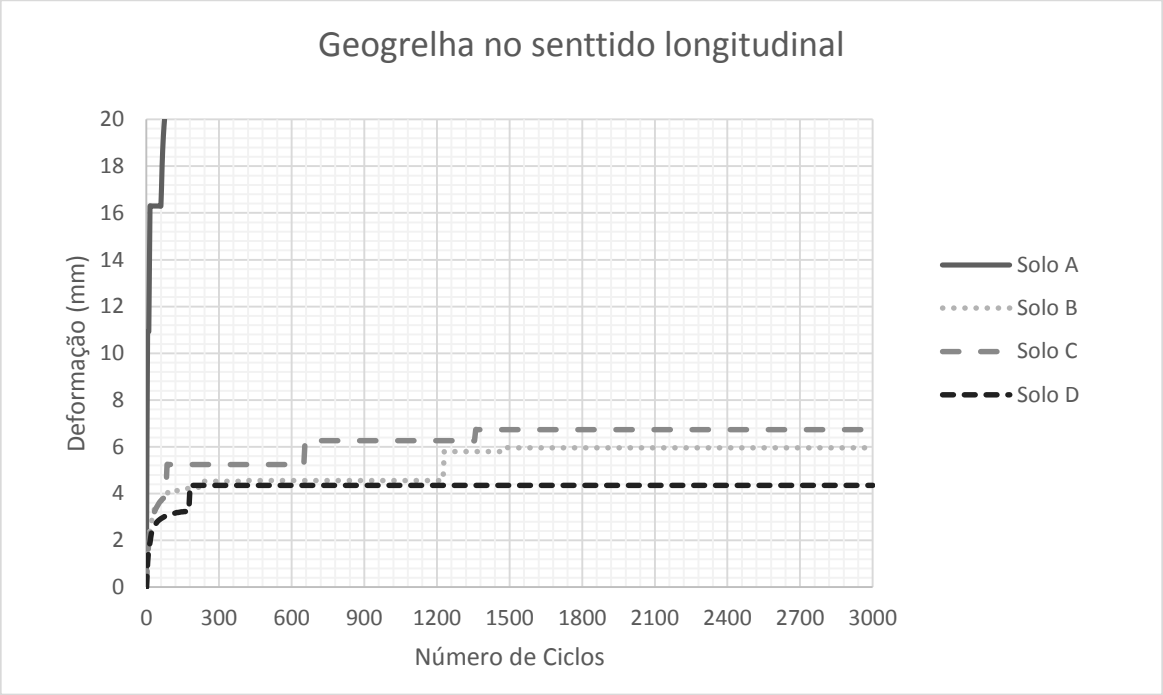


Figura 4.9 – Deformação dos solos quando colocada a geogrelha como reforço, no sentido longitudinal da caixa de ensaios

Como se pode observar, através da Figura 4.9, o solo A teve, mais uma vez, o pior comportamento, deformando 20 mm em menos de 100 ciclos. Tudo isto se deve, novamente, à reduzida percentagem de finos presentes na sua composição, o que não permite a agregação das partículas, levando, desta forma, ao afundamento mais rápido do solo na zona carregada (Figura 4.10). O influência da geogrelha quase não se fez sentir neste solo A.

Relativamente aos outros solos, todos eles obtiveram melhores resultados nos ensaios relativamente aos ensaios com esponja e sem reforço. De qualquer forma, os resultados ficaram aquém dos esperados. O ponto que influenciou acredita-se, significativamente os resultados, foi o facto da geogrelha, ser uma geogrelha com as características de uma geogrelha utilizada em campo e não em laboratório. Obviamente que trabalhar com uma geogrelha projetada para campo é diferente de trabalhar com uma geogrelha feita à escala do ensaio laboratorial. As aberturas da geogrelha deveriam ser mais pequenas, para que não houvesse tanto volume de solo afetado pela passagem da roda (carregamento) sem ajuda do reforço, ou seja, teria sido preferível fazer este tipo de ensaio com uma geogrelha desenhada à escala da roda utilizada nos ensaios.

Figura 4.10 – Aspeto da plataforma após ensaio do solo A com reforço colocado no sentido longitudinal da caixa de ensaios

De qualquer forma, através da análise à Figura 4.11, pode verificar-se que, mesmo com as limitações resultantes do tipo de geogrelha utilizada (tamanho das aberturas), é bastante significativa a diminuição da deformação dos solos.

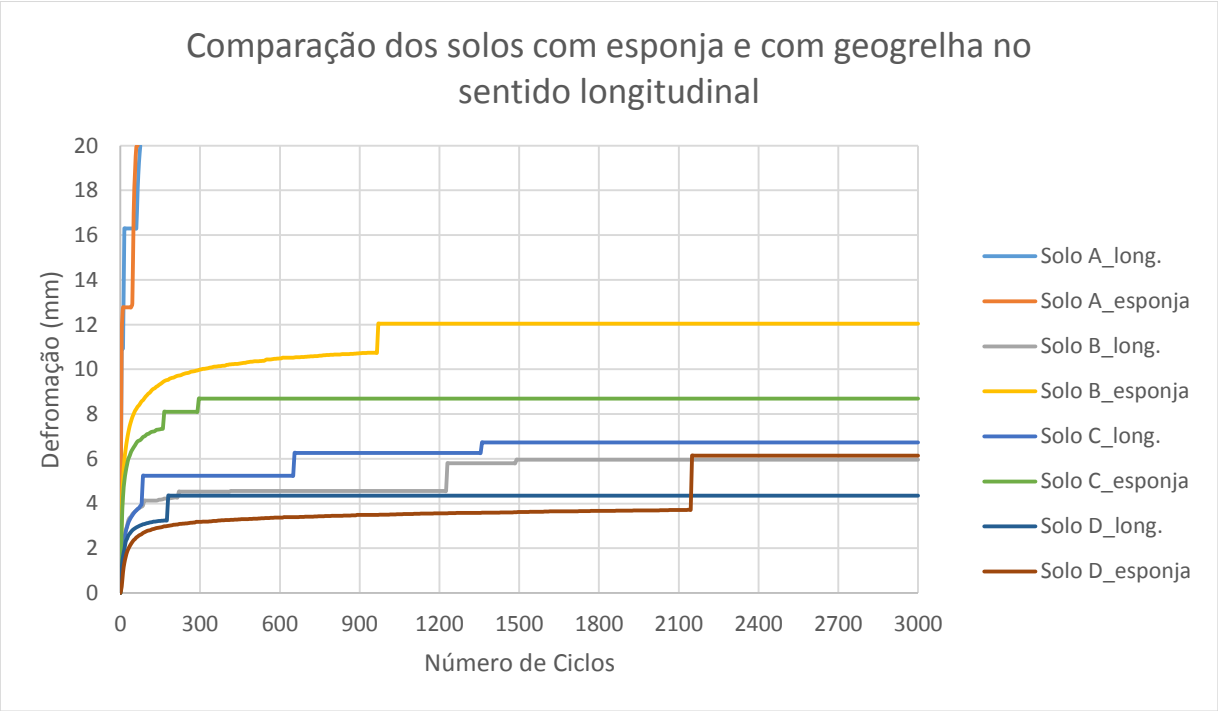


Figura 4.11 – Comparação das deformações dos solos com esponja e com a esponja mais a geogrelha no sentido longitudinal da caixa de ensaios

Através do Quadro 4.3 é mais percetível o grau de melhoria devido à colocação do reforço, sendo o solo B o solo com a maior percentagem de melhoria face aos resultados obtidos nos ensaios apenas com a esponja. Em termos de deformação, propriamente dita, o solo D é o que apresenta menor deformação, com cerca de 4,5 mm, seguindo-se o solo B com uma deformação de cerca de 6 mm.

Quadro 4.3 – Melhorias do comportamento dos solos após colocação da geogrelha no sentido longitudinal à caixa de ensaios

Solo	**Deformação (mm)**		**Melhoria (%)**
	Só esponja	Esponja com geogrelha_longitudinal	
A	20	20	0 %
B	12,04	5,96	50,5 %
C	8,69	6,73	22,6 %
D	6,14	4,35	29,2 %

4.5.2 Influência da geogrelha no sentido da largura da caixa de ensaios

Nesta seção, analisa-se o comportamento da plataforma, quando é colocada a geogrelha no sentido da largura da caixa de ensaios, ou seja, no sentido transversal. Os resultados obtidos para estes ensaios são os apresentados na Figura 4.12.

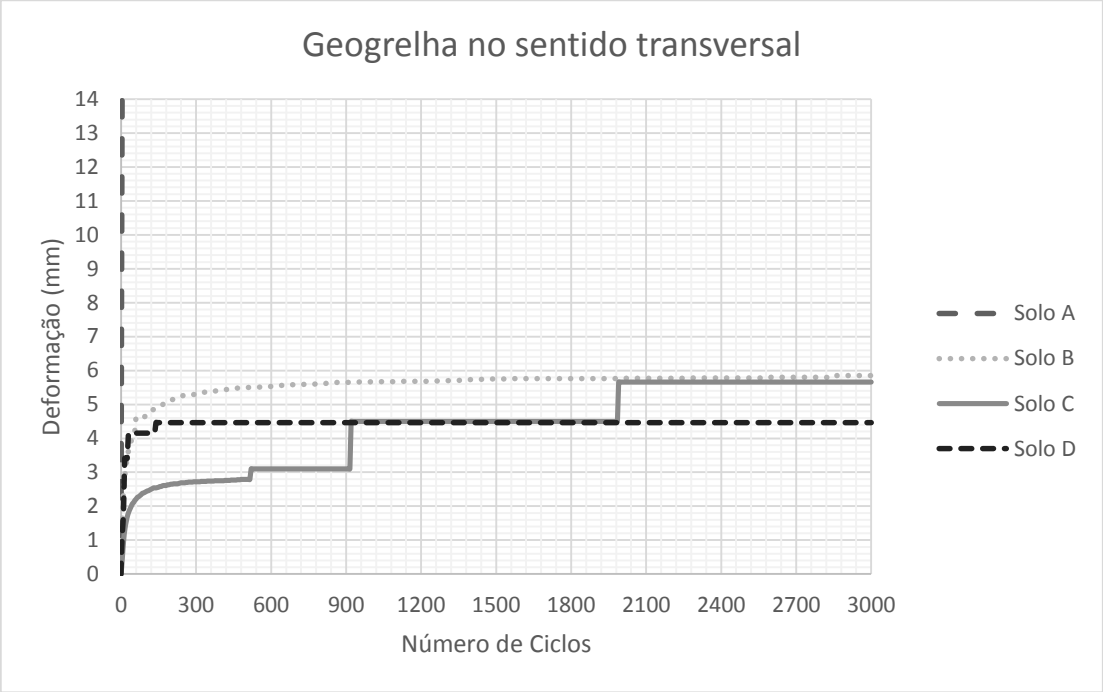


Figura 4.12 – Deformação dos solos quando colocada a geogrelha como reforço, no sentido transversal à caixa de ensaios

A partir da análise da Figura 4.12 percebe-se que, mais uma vez, o solo A teve um mau comportamento, pelas mesmas razões apresentadas anteriormente. Quanto aos outros solos, no geral, tiveram um melhor comportamento que nos ensaios apenas com a esponja (Figura 4.13). Observando o Quadro 4.4 conclui-se que os solos, na sua generalidade, tiveram uma grande melhoria com a colocação da geogrelha, embora as deformações tenham sido, mesmo assim, ligeiramente altas. Relativamente à Figura 4.13, esta tem a escala do eixo das ordenadas só até os 14 mm para ser mais percetível a diferença entre os vários resultados, embora a deformação do solo A tenha chegado aos 20 mm.

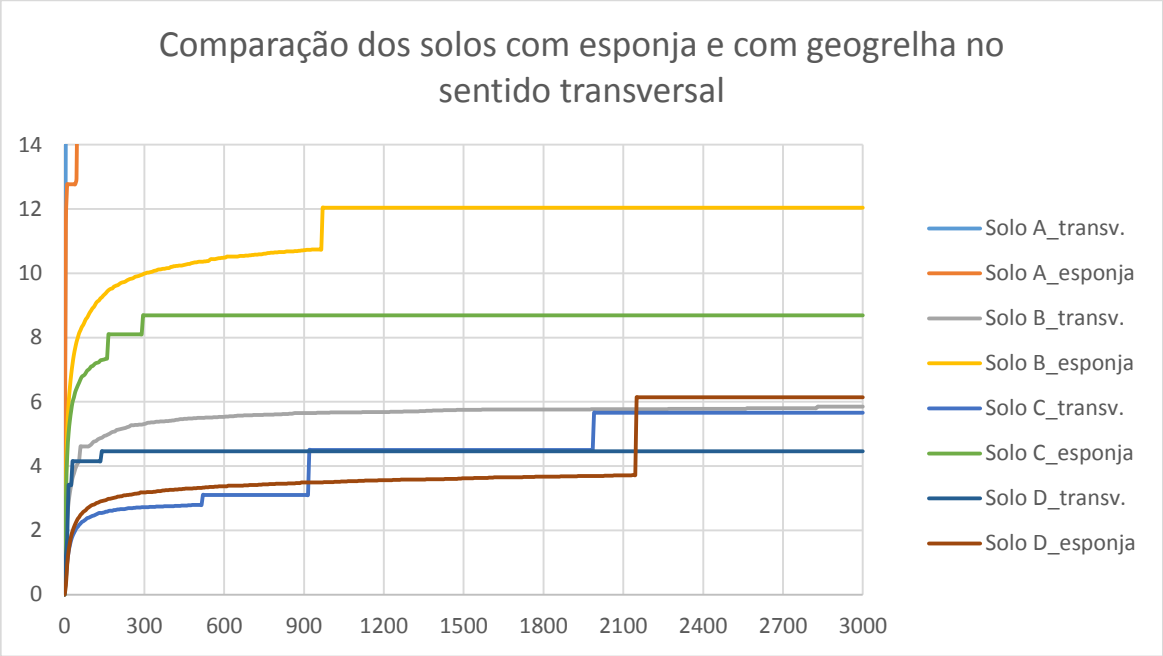


Figura 4.13 - Comparação das deformações da plataforma com esponja, e com a esponja mais a geogrelha no sentido transversal da caixa de ensaios

Ainda de salientar que, mais uma vez, os solos com melhor desempenho foram os solos D e B. O solo D apresentou novamente a menor deformação e o solo B a maior percentagem de melhoria, face aos ensaios apenas com esponja (Quadro 4.4).

Quadro 4.4 – Melhoria conseguida com a colocação da geogrelha no sentido transversal da caixa de ensaios

Solos	Deformação (mm)		Melhoria (%)
	Só esponja	Esponja com geogrelha_transversal	
A	20	20	0 %
B	12,04	5,85	51,4%
C	8,69	5.66	34,9 %
D	6,14	4,46	27,4 %

4.5.3 Influência do sentido de colocação do reforço

Da análise dos resultados das deformações para as duas posições estudadas da geogrelha, conclui-se que os solos, no geral, tiveram um comportamento semelhante, à exceção do solo C que teve uma maior melhoria no sentido transversal. De qualquer forma esta diferença de

melhorias não é muito acentuada, pois a diferença de deformações foi de cerca de 1 mm, o que não é muito significativo. A análise torna-se mais fácil, quando se observa a Figura 4.14 e o Quadro 4.5. Na Figura 4.14, a escala do eixo das ordenadas está só até os 10 mm para ser mais percetível a diferença entre todos os resultados.

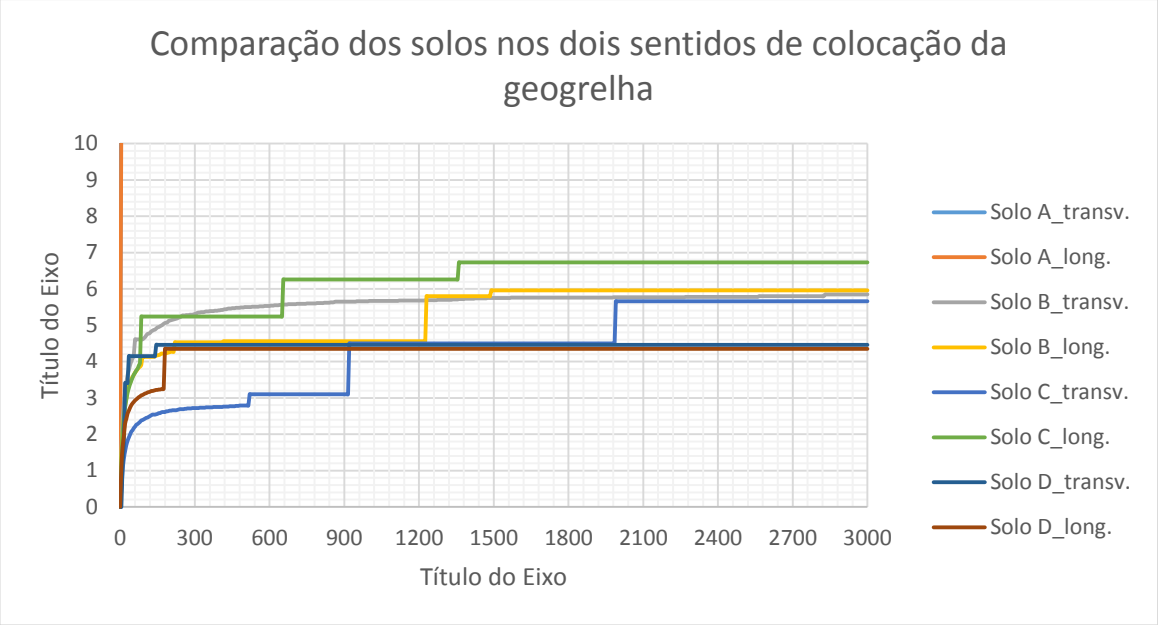


Figura 4.14 – Comparação do comportamento dos solos nos dois sentidos de colocação da geogrelha

Considerando as duas orientações de colocação da geogrelha na caixa de ensaios, pode-se fazer a análise das melhores soluções em termos de tipo de solo. Nesse caso, a conclusão a que se chega, tendo em consideração a análise feita ao Quadro 4.5, é de que o solo B é o solo que fica com melhor comportamento com a colocação da geogrelha em termos de percentagens de melhoria.

Quadro 4.5 – Melhorias conseguidas nos ensaios feitos para as duas direções de colocação da geogrelha

Solos	**Melhoria (%)**	
	Geogrelha_longitudinal	Geogrelha_transversal
A	0 %	0 %
B	50,2 %	51,4 %
C	22,6 %	34,9 %
D	29,2 %	27,4 %

4.6 Comparação de todos os ensaios

Neste ponto pretende-se analisar todos os ensaios feitos por forma a conseguir-se uma comparação para cada solo, chegando assim, a uma ou mais soluções ideais.

A partir da Figura 4.15 consegue-se observar todos os resultados dos ensaios feitos com o solo A. Como se pôde observar anteriormente, este solo teve os piores resultados quando comparado com todos os outros solos, tanto com humidade ótima, como seca e ainda quando colocada a esponja, e mesmo com a colocação da geogrelha. No geral, este foi o solo com piores comportamentos concluindo-se, desta forma, que este tipo de solo não deve ser considerado para a construção de estradas não pavimentadas. De referir, o facto da escala das abcissas estar apenas até aos 700 ciclos, por forma a tornar a análise o mais fácil possível. Sabe-se, no entanto, que para os teores ótimos e para o solo seco o número de ciclos chegou aos 3000.

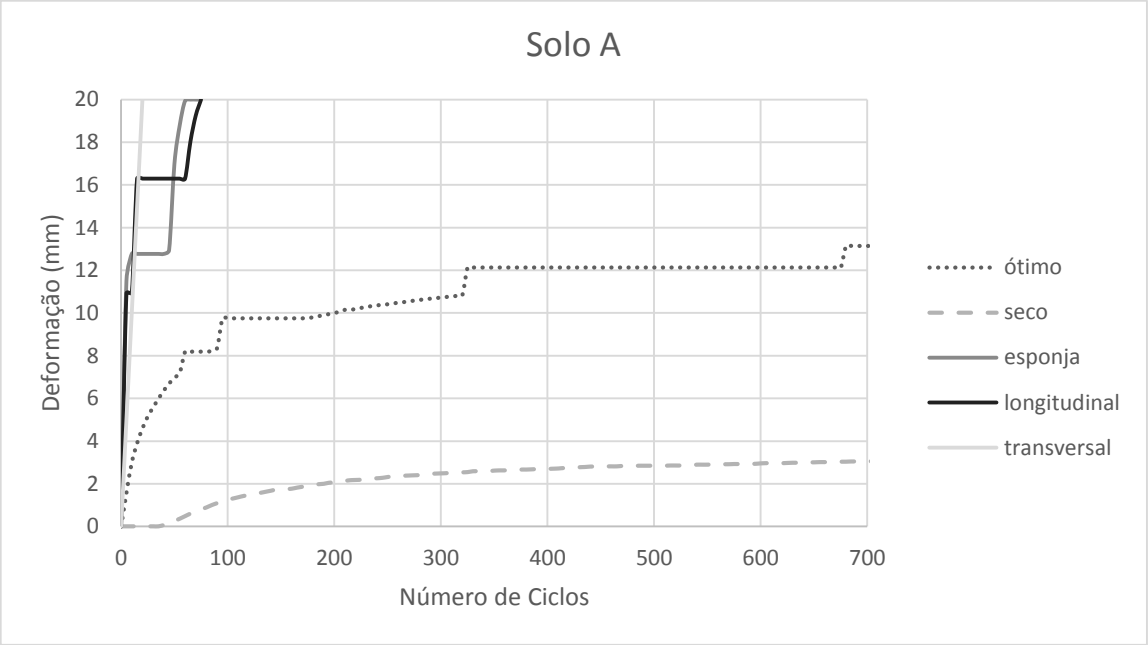


Figura 4.15 – Comparação de todos os ensaios para o solo A

Na figura 4.16 estão representados os resultados de todos os ensaios efetuados sobre o solo B, na figura 4.17 estão representados os resultados respeitantes ao solo C e na Figura 4.18 estão os resultados respeitantes ao solo D. Comparando estas três figuras percebe-se que o solo D foi o que apresentou os melhores resultados em todos os ensaios realizados, em termos de deformação propriamente dita. Tendo isto em consideração, dir-se-ia que o solo D é o solo de eleição para obras rodoviárias, o que vem comprovar a informação encontrada na literatura, de que o solo deve ser granular e ter algumas partículas finas.

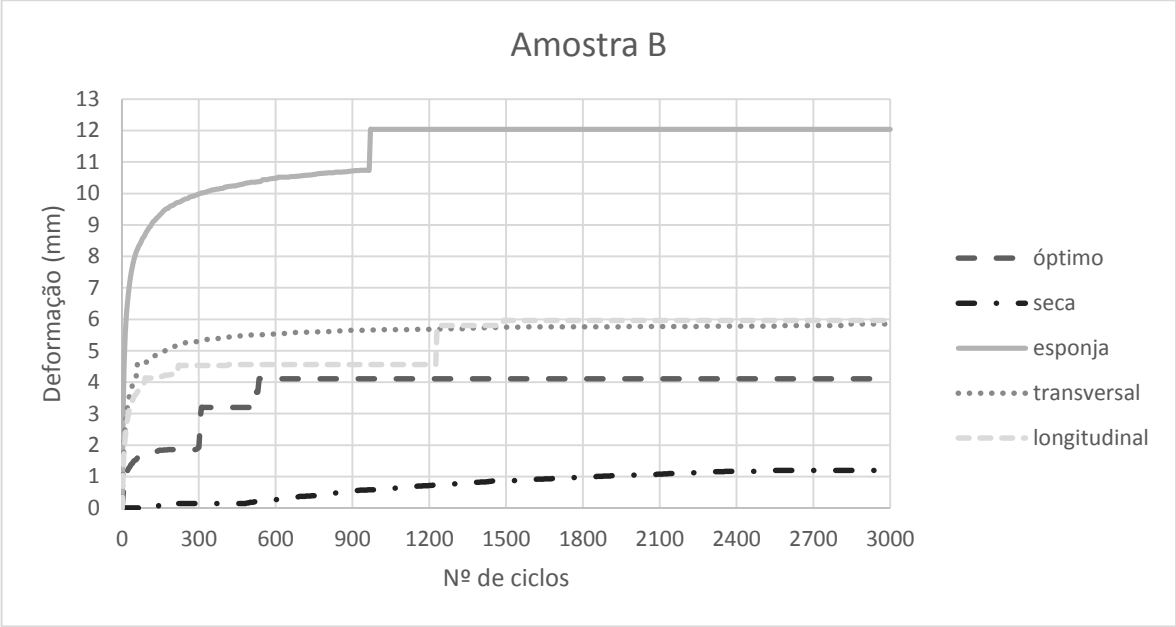


Figura 4.16 – Comparação de todos os ensaios para o solo B

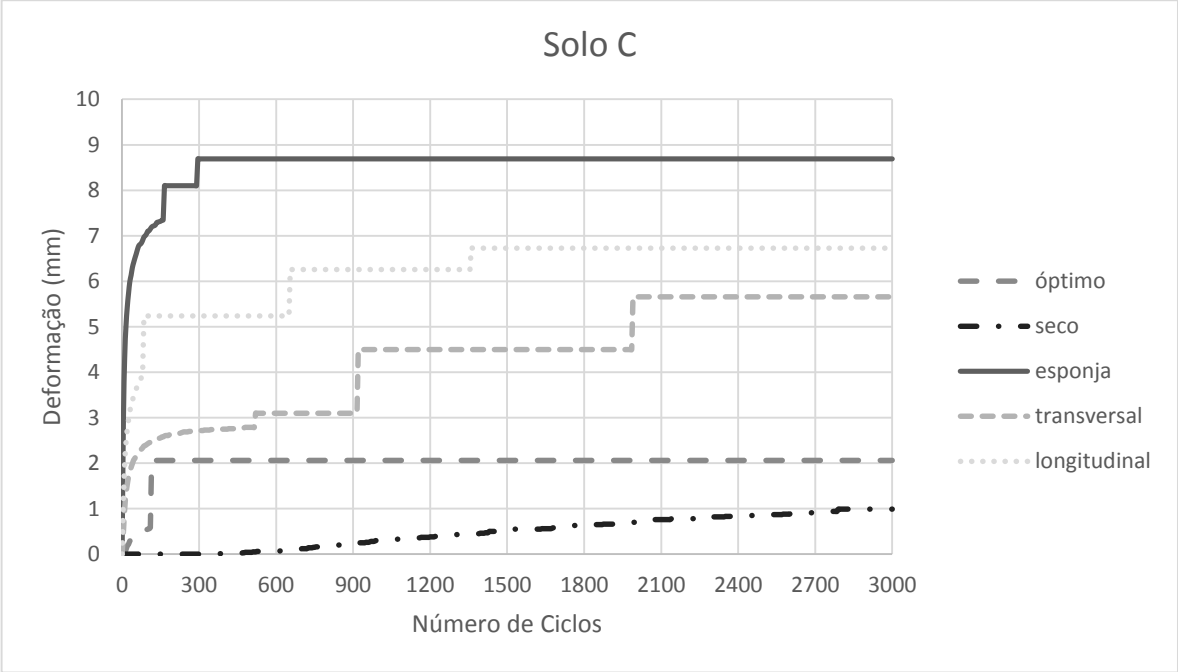


Figura 4.17 – Comparação de todos os ensaios para o solo C

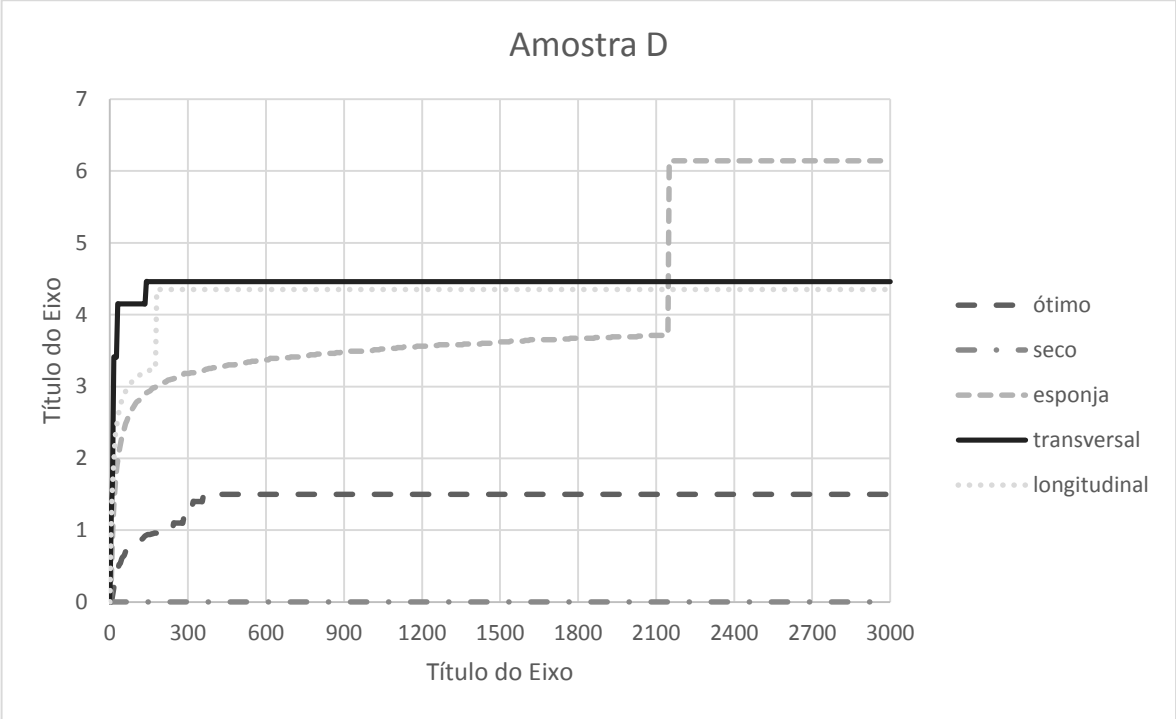


Figura 4.18 – Comparação de todos os ensaios para o solo D

Na Figura 4.19 consegue-se ver como é que variam as percentagens de melhoria (com os solos secos e a geogrelha nas duas orientações de colocação) e as percentagens de agravamento (com a esponja). A partir desta figura é possível afirmar que o solo de eleição volta a ser o D, embora os solos B e C também se comportem bastante bem, principalmente em situações mais complicadas como do solo com fundação muito fraca (solo B foi o melhor) e reforçado com geogrelha (solo B foi o melhor). Em termos de resultados para os ensaios com a geogrelha, pode-se observar que em termos de melhoria, há uma variação contínua entre os solos B, C e o solo D. O Quadro 4.6 apresenta um resumo dos primeiros e dos segundos melhores solos, que apresentaram melhores resultados, para cada tipo de ensaios de pista efetuados. Resumindo, o solo de eleição, neste tipo de situações, seria o solo D, embora os solos B e C, em condições de mais instabilidade, como é o caso de fundações instáveis, sejam solos a que se devesse recorrer para a construção das estradas não pavimentadas.

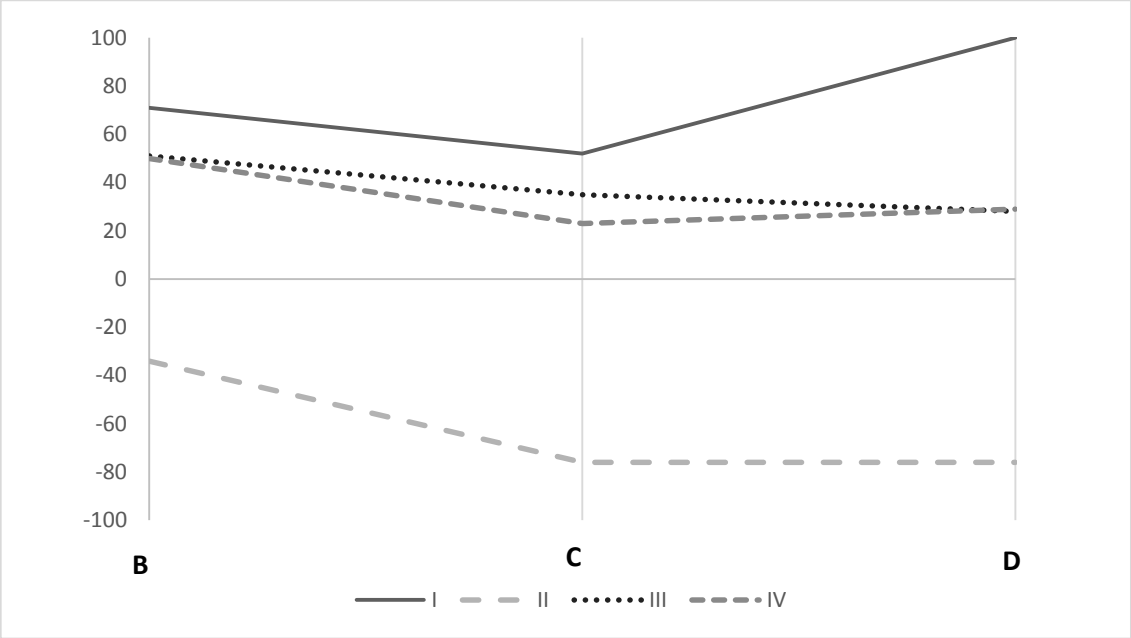


Figura 4.19 – Variação da deformação para os solos tipo B, C e D
I – seco em relação ao ótimo; II – esponja em relação a solo sem esponja; III – esponja com geogrelha no sentido transversal em relação a esponja só; IV – esponja com geogrelha no sentido longitudinal em relação a esponja só

Caso se pudesse ter feito ensaios com os solos saturados em água e, tendo em conta o que se encontra na literatura e a experiência de utilização de terrenos nessas condições, muito provavelmente o que iria acontecer, principalmente no solo D, era que este iria ter resultados piores que os outros três tipos de solo. Isto aconteceria, devido à elevada percentagem de finos presentes no solo, que em condições de extrema humidade, o seu comportamento iria sofrer a influência da plasticidade exibida, logo afundaria bastante mais rapidamente com a passagem da roda. Desta forma, os solos que elegeria para construção de estradas, seriam os solos B e C.

Quadro 4.6 – Os primeiros e segundos melhores solos para cada tipo de ensaio

Ensaio	**1º Melhor**	**1 º Melhor (em termos % de melhoria)**	**2º Melhor**	**2 º Melhor (em termos de % melhoria)**
Teor ótimo	D	-	C	-
Seco	D	D	C	B
Esponja	D	B	C	C/D
Geogrelha_transversal	D	B	C	C
Geogrelha_longitudinal	D	B	B	D

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho deu início a uma nova linha de investigação no DEC sobre o comportamento das estradas não pavimentadas.

O trabalho realizado pretendeu determinar quais os melhores solos para a construção de estradas não pavimentadas, como a época seca influencia o comportamento destas estradas, como a construção destas sobre uma fundação instável compromete toda a obra e como o reforço pode melhorar situações de instabilidade. Esta seção resume as principais conclusões que foi possível alcançar tendo em conta os resultados experimentais obtidos.

A primeira conclusão a retirar dos ensaios prende-se com os solos que melhor se comportam quando sujeitos a carregamentos nos seus respetivos teores ótimos de humidade, sem nenhum tipo de reforço. Concluiu-se que o solo D, por ser o solo com maior percentagem de argila (o que lhe confere maior agregação) é o solo com melhor comportamento neste tipo de ensaio. Em oposição, o solo A, que é o solo que não contém finos, foi o solo que sofreu o maior afundamento devido ao carregamento provocado pela roda. Para além destas conclusões, também é importante referir que a mínima percentagem a mais ou a menos de argila pode influenciar bastante o desempenho de um dado solo quando sujeito a este tipo de ensaio. Prova disso são os solos B e C que, embora apresentem uma composição granulométrica bastante semelhante, nos ensaios tiveram comportamentos diferentes.

Em seguida verificou-se que os solos em épocas secas comportam-se melhor, observando-se um aumento das suas resistências. O solo D foi, novamente, o solo que apresentou melhores resultados, isto devido à elevada percentagem de material fino que confere ao solo uma maior agregação de partículas, o que resulta no aumento da resistência aos carregamentos.

Relativamente aos ensaios com a colocação da esponja no fundo da plataforma, estes pretendem confirmar que o comportamento de uma estrada, quando construída sobre uma fundação instável, não é o melhor. De facto, confirmou-se um pior comportamento em todos os ensaios. O solo A foi, mais uma vez, o solo com o pior desempenho, obtendo resultados nada satisfatórios. A explicação para este comportamento está relacionada, novamente, com a

ausência de argila na sua constituição. Em termos de percentagem de agravamento de resultados, relativamente aos ensaios sem esponja, o solo B foi o solo que apresentou a menor percentagem.

Incidindo agora sobre o comportamento dos solos com fundação instável, mas reforçados, os resultados foram, na generalidade, melhores do que os resultados obtidos sem reforço. Embora tenha ocorrido uma significativa melhoria em todos os ensaios, seriam de esperar melhores resultados do que os obtidos. Tais resultados não se conseguiram devido ao tipo de geogrelha que foi utilizada, pois esta tem características de utilização em campo. O que acontece é que esta geogrelha tem aberturas demasiado grandes para os ensaios em laboratório. Desta forma, seria de esperar uma maior melhoria com o uso de uma geogrelha com aberturas de menores dimensões.

Outra conclusão retirada dos ensaios com a utilização da geogrelha é de que o solo A teve, uma vez mais, um comportamento muito mau. Desta forma, concluiu-se que este solo não é indicado para a construção deste tipo de obra de engenharia civil. Também é de referir que, em termos gerais, houve uma variação contínua em termos de melhorias percentuais e de deformações propriamente ditas, entre os solos B, C e D, relativamente aos resultados obtidos apenas com esponja. Em termos de sentido de colocação da geogrelha, na generalidade dos ensaios, obtiveram-se resultados semelhantes para os sentidos transversal e longitudinal de colocação relativa ao sentido do tráfego.

Por último, tentou-se observar, comparando todos os resultados obtidos, qual(ais) o(s) solo(s) que melhor se comportaram e adaptaram, às várias situações de ensaio. Concluiu-se que, em geral, em termos de deformação propriamente dita, os solos D e C foram os que se comportaram melhor, embora em termos de melhorias percentuais o solo B tenha sido o solo com melhores resultados, seguindo-se a este o solo C. Para além destes resultados deve-se ter em consideração que, caso se tivessem feito ensaios com os quatro tipo de solo saturados (o que acontece em épocas de chuva), o que iria acontecer aos solos com maior percentagem de argila, como é o caso do solo D, é que provavelmente teriam um comportamento muito negativo, deformando-se e afundando-se bastante devido à passagem da roda.

Tendo todos estas análises em consideração é possível concluir que os solos B e C seriam os solos de eleição caso se quisesse proceder à construção e manutenção de uma estrada não pavimentada.

5.2 Trabalhos futuros

Com este ponto pretende-se fazer algumas sugestões para desenvolvimentos futuros, tendo em conta o trabalho que foi feito e tendo em vista o melhoramento e a ampliação deste mesmo trabalho.

De seguida, são então enumeradas alguns possíveis trabalhos a realizar futuramente:

i. Utilizar uma geogrelha à escala mais próxima da caixa de ensaios, por forma a garantir que os resultados são o mais próximo possível da realidade, ou seja, a relação de tamanhos de espaços (vazios) da geogrelha e da largura da roda seja proporcional nos ensaios e nas estradas reais;
ii. Variar a posição/localização da geogrelha dentro do aterro;
iii. Introduzir no estudo um outro tipo de geogrelha, para desta forma, ser possível comparar os resultados da geogrelha introduzida com a geogralha já ensaiada;
iv. Fazer os mesmos ensaios, mas usando geotêxteis e fibras têxteis como material de reforço;
v. Fazer os mesmos ensaios com o mesmo tipo de solos, mas com os solos saturados para simular épocas de chuva;
vi. Fazer o mesmo tipo de ensaios mas com outro tipo de solos, ou seja, utilizar outros materiais de aterro nos ensaios;
vii. Fixar, para os ensaios de pista, ao invés de um número de ciclos, um número máximo de deformação, por exemplo 20 mm, tendo em conta que é o valor máximo conseguido pela máquina de ensaios.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (1983). "Recommended practice for the classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes". M145-82, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.

ANMP (s.d.). "Norma de Características Técnicas das Estradas Municipais". Associação Nacional de Municípios Portugueses, pp. 1-69.

Archondo-Callao, R. (2004). "Economically Justified Levels of road works expenditures on unpaved rads". Transport Notes – Roads and rural transport thematic group, Transport Note NO. TRN -2.

Archer, S. (2008). "Subgrade Imrovement for Paved and Unpaved Surfaces Using Geogrids". Professional Development Advertising Section – CONTECH Construction Products Inc.

ASTM (2009). "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". D2487-11, ASTM International, West Conshohocken.

Barbosa, G. (2010). "Pavimentos com base reforçada com geogrelha: Análise de desempenho". Trabalho de Diplomação, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Barreto, F. (2013). "Beneficiação, Reabilitação e Manutenção de estradas". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.

CIA@(2015), https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/, Central Intelligence Agency, EUA.

DOT, (1990). "The structural design, construction and maintenance of unpaved roads". Pretoria: Department of Transport (Draft TRH 20).

Direção de Unidade de Defesa de Floresta (DUDF), (2012). " Plano Municipal de Defesa da Floresta contra Incêndios (PMDFCI) – Guia Técnico". Autoridade Florestal Nacional, Portugal.

E195 (1966). “Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação”. Documentação Normativa – Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

E196 (1966). “Análise Granulométrica”. Documentação Normativa – Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

E197 (1966). “ Ensaio de Compactação”. Documentação Normativa – Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

E198 (1967). “Determinação do CBR”. Documentação Normativa – Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

FCE (2004). “The forestry civil engineering handbook.”

Ferreira, A. (2014), Infraestruturas Rodoviárias – Desenvolvimentos Necessários nos Próximos Anos, *Ingenium*. Submetido para publicação.

Ferreira, F. (2007). “Uma aplicação comparativa de métodos de avaliação das condições superficiais de estrada não-pavimentada”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

Fortunato, E., Alves, E., Antunes, M., Freire, A. (2013). “Curso de estradas de baixo volume de tráfego”. LNEC, Lisboa.

Góngora, I. (2011). “Utilização de geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas: influência do tipo de reforço e do material de aterro”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

Maine Department of Environmental Protection (DEP), (2010). “Gravel Road Maintenance Manual – A Guide for Landowners on Camp and other Gravel Roads”. Main, USA.

Massachusetts Department of Environmental Protection (MDEP), (2001). “Unpaved Roads – BMP Manual”. Project 98-06/319, MDEP, Massachusetts.

Neves, P. (2013). “Uso de geossintéticos em estradas não pavimentadas: Avaliação experimental em um protótipo de grande dimensão.” Dissertação de Mestrado, Unidade de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual de Goiás, Anápolis.

NP-83 (1965). “Determinação da densidade das partículas”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

NP-84 (1965). “Determinação do teor em água”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

NP-143 (1969). “Determinação dos limites de consistência”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

ODA, S. (1995). “Caracterização de uma rede municipal de estradas não pavimentadas”. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 186p.

Paiva, C., Joaquim, A., Ferreira, A. (2015), Análise comparativa de metodologias para o dimensionamento das camadas superiores de estradas não pavimentadas, *3.º Congresso para a Ciência e Desenvolvimento dos Açores*, CD Ed., pp. 1-16, Terceira, Açores, Portugal.

Santos, A., Pastore, E., Júnior, F., Cunha, M. (1988). “Estradas vicinais de terra: manual técnico para conservação e recuperação”. 2ª edição, IPT, São Paulo.

Santos, I. (2013). “Estabilidade de geomateriais em estradas não pavimentadas. Propriedades relevantes e métodos de dimensionamento”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.

Santos, J. (2008). “Compactação – elementos teóricos”. Obras geotécnicas, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Subaida, E., Chandrakaran, S., Sankar, N. (2009). “Laboratory performance of unpaved roads reinforcement with woven coir textiles”. Elsevier – Journal of Geotextiles and Geomembranes, vol. 27, pp. 204-210.

Silva, T. (2009). “Estudo de estradas não pavimentadas da malha viária do município de Viçosa – MG”. Tese de Doutoramento, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

Tensar International Limited (TIL), (2012). “Geossintéticos Tensar na Engenharia – Guia de produtos, aplicações, sistemas e serviços “. Publicação 2, Issue 13, UK.

Vidal, D. (2002). “Aplicação em pavimentos”, Sebenta do Curso de Aplicação de geossintéticos às obras civis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo.

7 OUTRA BIBLIOGRAFIA RELEVANTE

Basu, G., Roy, A., Bhattachoryya, S., Ghosh, S. (2009). "Construction of unpaved rural road using jute-synthetic blended woven geotextile – A case study". Elsevier – Journal of Geotextiles and geomembranes, vol. 27, pp. 506-512.

Centurion, C., Vitela, A., Marquina, M, (2005). "Uso de geogrelhas para a redução da espessura do pavimento e melhoramento de subleito e solos de baixa capacidade de suporte na rodovia Iquitos – Nauta". TDM, Iquitos, Peru.

Cook, J., Petts, R., Rolt, J. (2013). "Low volume rural road surfacing and pavements – A guide to good practice". OTB Engineering, UK.

Federal Higway Administration Local Technical Assistance Program (LTAP), (2004). "Field guide for unpaved rural roads". LTAP, Kansas.

Henning, T., Kadar, P., Bennett, C. (2006). "Surfacing alternatives for unsealed rural roads". Transport Notes – Roads and rural transport thematic group, Transport Note NO. TRN-33.

Maciel, C. (2010). "Análises geotécnicas e hidrossedimentológicas de estradas não pavimentadas: estudo de caso da Fazenda Cerro Azul – Planalto Norte Catarinense". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Palmeira, E., Antunes, L. (2010). "Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjects to surface maintenance". Elsevier – Journal of Geotextiles and Geomembranes, vol.28, pp. 547-558.

Palmeira, E. "Geosynthetics in Unpaved Roads". International Geosynthetics Society, USA.

Tang, X., Chehab, G., Palomino, A. (2008). "Evaluation of geogrids for stabilising weak pavement subgrade". International Journal of Pavement Engineering, pp. 413-429.

Vermont Local Roads, (1984). "The basics of a good road". Saint Michael's College, Vermont.