



Ana Raquel Alves Guedes

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE SOLO TRATADO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

## STUDY OF THE BEHAVIOR OF TREATED SOIL ON UNPAVED ROADS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,  
orientada pelo Professor Doutor Maria Isabel Moita Pinto e pelo Professor Doutor Adelino Jorge Lopes Ferreira

Coimbra, 6 de setembro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Ana Raquel Alves Guedes

# **Estudo do comportamento de solo tratado em estradas não pavimentadas**

## **Study of the behavior of treated soil on unpaved roads**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia, orientada pelo Professor Doutor Maria Isabel Moita Pinto e pelo Professor Doutor Adelino Jorge Lopes Ferreira

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Coimbra, 6 de setembro de 2018

*“ A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou  
sobre aquilo que todo mundo vê”  
(Arthur Schopenhauer)*

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer, em primeiro lugar, aos meus pais, Paula e Carlos, por me darem a oportunidade de aprender e por nunca terem desistido de mim. Agradeço tanto a nível académico como pessoal, a oportunidade de aprender, conhecer e crescer ao longo dos últimos anos.

Agradeço em especial ao meu namorado Gonçalo, pelo apoio, companheirismo e incentivo que me deu para atingir os meus objectivos de vida profissional e pessoal. Obrigada pelo carinho e força demonstrado.

Agradeço também aos meus amigos, em especial à Ana Carina, Joana, Maria João, Ana Sofia e Marina, que me apoiaram, acompanharam e alegraram em todo este percurso. Um obrigada especial às minhas colegas e amigas Ana Sofia e Beatriz por todo o companheirismo ao longo destes anos académicos.

Um agradecimento especial aos meus orientadores Professora Maria Isabel Moita Pinto e Professor Adelino Jorge Lopes Ferreira, pela constante disponibilidade, compreensão, ajuda, acompanhamento e dúvidas esclarecidas ao longo desta dissertação. Um obrigada muito especial ao senhor José António pela paciência, ajuda e disponibilidade no laboratório.

Agradeço à Argex - Argila pela cedência da argila estudada no solo.

E agradeço ao Laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural pela disponibilização da prensa hidráulica.

## RESUMO

As estradas não pavimentadas constituem, no país e no estrangeiro, um número significativo de vias rodoviárias com baixo custo de construção, mas que têm necessidade de frequentes intervenções de conservação periódica e conservação corrente. Esta necessidade deve-se, em geral, às fracas qualidades do solo utilizado na sua construção, não tendo correspondência com as acções destrutivas a que estas estradas estão sujeitas.

O trabalho desenvolvido inclui, numa primeira fase, a caracterização das estradas não pavimentadas e uma análise da sua importância no contexto nacional e internacional. Numa segunda fase procede-se ao levantamento, compilação e análise dos aspectos mais importantes dos processos construtivos e de dimensionamento estabelecidos a nível nacional e internacional. Estuda-se a influência das características consideradas mais importantes, nomeadamente do solo, da geometria da estrada, do tráfego, do clima.

Por último, faz-se uma análise do benefício da utilização de solo tratado (com dois líquidos estabilizadores químicos) comparativamente à utilização habitual do solo não tratado e faz-se um estudo paramétrico. Para tal, são realizados estudos do comportamento do solo tratado e não tratado, nomeadamente através de ensaios de pista onde se simula a passagem dos veículos e se mede a deformação da via, procedendo-se posteriormente à análise da influência dos diferentes tipos de tratamento. Verificou-se uma acentuada melhoria nos resultados aquando da análise da influência do tratamento do solo estudado.

### Palavras-chave

Construção, tratamento do solo, estradas não pavimentadas, líquido estabilizante químico, compactação, ensaio de pista, conservação

## **ABSTRACT**

There are a significant number of unpaved roads, a low-cost type of roadways, both in the country and abroad. However, these roads require frequent interventions for periodic conservation and regular maintenance. This need is due in general to the poor quality of the soil used in the construction, not corresponding to the destructive actions to which these roads are subject.

The work carried out initially includes the characterization of unpaved roads and an analysis of their importance in the national and international context. In a second phase, the most important aspects of the construction and design processes established at national and international level are collected, compiled and analyzed. In this analysis a study was carried out on the influence of the most important characteristics, namely soil, road geometry, traffic, climate, etc.

Finally, an analysis is carried out on the benefit of the use of the soil improvement (with chemical stabilizer liquid), compared to the non-improved soil, by means of a parametric study. For this purpose, a study of the behavior of the improved and non-improved soil was carried out, in particular by wheel track tests where the passage of vehicles are simulated with the track deformation measured, and the influence of the improvement can then be analyzed. A marked improvement in the behavior was verified when the analysis of the influence of soil improvement was performed.

### **Key-words**

Construction, soil improvement, unpaved roads, chemical stabilizer liquid, compaction, wheel tracking test, conservation.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE QUADROS .....	x
SIMBOLOGIA .....	xii
ABREVIATURAS .....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Breve introdução sobre a importância das estradas não pavimentadas .....	3
2.2 Elementos e constituição de uma estrada não pavimentada .....	7
2.2.1 Constituição da estrada.....	7
2.2.2 Geometria .....	8
2.2.3 Solo.....	9
2.2.4 Elementos de drenagem.....	10
2.2.5 Capacidade de Suporte .....	11
2.3 Danos Comuns.....	12
2.4 Características técnicas da estrada.....	15
2.4.1 Capacidade de suporte .....	15
2.4.2 Geometria do traçado, aderência e drenagem de águas.....	17
2.5 Métodos de avaliação das condições de circulação da estrada.....	17
2.6 Aspectos económicos.....	20
2.7 Reforço e tratamento de estradas não pavimentadas .....	24
2.7.1 Geossintéticos.....	24
2.7.2 Líquido estabilizante químico .....	28
2.7.3 Pure Crete .....	28
2.7.4 Ecolopavi.....	31
3 DESENVOLVIMENTO LABORATORIAL: MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 Breve Introdução.....	33
3.2 Solo.....	33
3.3 Líquido estabilizante químico: Materiais e Métodos utilizados .....	37
3.4 Equipamento utilizado nos ensaios.....	40

---

3.4.1	Molde.....	40
3.4.2	Prensa hidráulica para densificação.....	40
3.4.3	Ensaio de Pista – Máquina Wheel Tracking.....	41
3.5	Caracterização e plano de ensaios .....	42
3.5.1	Caracterização do provete de ensaio .....	42
3.5.2	Planos de Ensaio de Pista.....	42
4	TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	44
4.1	Introdução .....	44
4.2	Comportamento do solo sem tratamento .....	44
4.3	Comportamento do solo tratado com Líquido 1 (Pure Crete) .....	46
4.4	Comportamento do solo tratado com líquido 2 (Ecolopavi).....	50
4.5	Comparação de todos os ensaios – Melhor solução.....	53
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	58
5.1	Conclusões .....	58
5.2	Trabalhos futuros .....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 -Estrada não pavimentada .....	4
Figura 2.2 - Perfil transversal de uma estrada não pavimentada (Santos, 2013).....	9
Figura 2.3 - Secção transversal inadequada: a) secção transversal em calha b) secção transversal abaulada e encaixada c) secção transversal mista d) Estrada não pavimentada com secção transversal mista (Nunes, 2003) .....	12
Figura 2.4 - Secção transversal com severidade média (1) e com severidade alta (2) (ODA, 1995).....	14
Figura 2.5 - Relação entre a rugosidade média da estrada e o total de custos operacionais de veículos (adaptado de DOT, 1990).....	22
Figura 2.6 - Mecanismos típicos de degradação em estradas não pavimentadas em solos moles (IGS Portugal @).....	25
Figura 2.7 - Influência do reforço de geossintético no comportamento de estradas não pavimentadas (IGS Portugal @).....	25
Figura 2.8 - Influência do geossintético na resistência do solo mole (IGS Portugal @).....	27
Figura 2.9 - Influência do geossintético na resistência do solo mole (IGS Portugal @).....	29
Figura 2.10 - Comparação de construção de uma estrada nova (@Wix).....	30
Figura 2.11 - Comparação de uma estrada antes e depois da aplicação de Ecolopavi em Manaus, Brasil (@Ecolpavi – Slideshare).....	31
Figura 3.1 – Curva granulométrica do solo .....	34
Figura 3.2 – Preparação da amostra e ensaios de Peneiração e Sedimentação para o cálculo da curva granulométrica .....	35
Figura 3.3 – Curva de compactação leve do solo utilizado .....	36
Figura 3.4 - Molde utilizado para provetes de ensaios de pista.....	40
Figura 3.5 - Prensa hidráulica utilizada para a densificação .....	40
Figura 3.6 - Máquina Wheel Tracking .....	41
Figura 3.7 - Câmara de acondicionamento do provete .....	41
Figura 3.8 - Software utilizado no ensaio de pista .....	41
Figura 3.9 - Distribuição do solo em camadas no provete .....	42
Figura 4.1 – Deformação do solo não tratado .....	45

---

Figura 4.2 - Pormenores do estado do solo não tratado após o ensaio de pista.....	45
Figura 4.3 - Deformação do solo sem tratamento e tratado com diferentes percentagens do líquido 1 .....	46
Figura 4.4 - Pormenores do estado do solo tratado, após o ensaio de pista n° 1 .....	47
Figura 4.5 - Deformação do solo sem tratamento e tratado com diferente número de camadas tratadas com o líquido 1 .....	48
Figura 4.6 - Deformação do solo durante o Ensaio 4 .....	49
Figura 4.7- Deformação do solo sem tratamento e tratado para diferentes percentagens de líquido 2 com carga leve.....	51
Figura 4.8 - Pormenores do estado do solo tratado após o ensaio de pista com líquido 2 .....	51
Figura 4.9 – Deformação do solo sem tratamento e tratado para diferentes percentagens de líquido 2 com carga pesada.....	52
Figura 4.10 – Deformação de todos os ensaios de pista com carga leve.....	54
Figura 4.11 – Todos os ensaios de pista de carga pesada.....	56

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Percentagem de estradas não pavimentadas relativamente ao total de estradas (km) em vários países (CIA@2015).....	6
Quadro 2.2 – Perfil transversal tipo (adaptado de ANMP, (s.d) .....	9
Quadro 2.3 - Elementos de drenagem de uma estrada não pavimentada (adaptado de Santos, 2013 e Fortunato et al., 2013).....	11
Quadro 2.4 - Danos comuns (adaptado por Santos, 2013; Santos, 1988; DOT, 1990).....	13
Quadro 2.5 - Classes de Terrenos de Fundação (retirado de ANMP, (s.d.)).....	16
Quadro 2.6 - Comparação dos métodos de avaliação das condições das estradas (adaptado de Ferreira, 2007) .....	18
Quadro 2.7 - Defeitos avaliados em cada método de avaliação (adaptado de Ferreira, 2007)	19
Quadro 2.8 - Níveis de qualidade analíticos para a qualidade de estradas pavimentadas e não pavimentadas (adaptado de Archando - Callao, 2004).....	21
Quadro 2.9 - Velocidades dos veículos, COV e CUE, para estação seca e estação húmida (Archando-Callao, 2004) .....	22
Quadro 2.10 - Custos de investimento de manutenção do nível de qualidade de uma estrada (×1000\$/km) (Archando-Callao, 2004).....	23
Quadro 2.11 - As principais funções de cada tipo de geossintético (adaptado de Barbosa, 2010).....	25
Quadro 2.12 - Tipo de reagentes para cada tipo de solo (@Ecolopavi-Slideshare).....	31
Quadro 3.1 – Tipos de solos usados nos ensaios laboratoriais .....	33
Quadro 3.2 - Principais características geotécnicas do solo utilizado.....	34
Quadro 3.3 – Classificação do solo utilizado .....	37
Quadro 3.4 - Aplicação dos dois líquidos in situ e em Laboratório .....	38
Quadro 3.5 - Plano de Ensaios de Pista realizado na dissertação.....	43
Quadro 4.1 - Influência da percentagem de líquido 1 .....	47
Quadro 4.2 - Influência do número de camadas tratadas com o líquido 1 .....	48
Quadro 4.3 - Influência da distribuição e carga líquido 1 .....	49
Quadro 4.4 - Influência da percentagem e carga do líquido 2 (carga leve).....	52
Quadro 4.5 – Influência da percentagem do líquido 2 para carga pesada.....	53
Quadro 4.6 – Influência da percentagem e distribuição de líquido com carga leve.....	54

Quadro 4.7 – Melhor solução para ensaio de pista com carga leve.....	55
Quadro 4.8 – Influência da percentagem e distribuição de líquido com carga pesada.....	56
Quadro 4.9 – Melhor solução para ensaio de pista com carga pesada .....	57
Quadro 4.10 – Solução otimizada para ensaio de pista .....	57

## **SIMBOLOGIA**

$CO_2$  – Dióxido de carbono

$w_L$  – Limite de liquidez

$w_P$  – Limite de plasticidade

$w$  – Teor em água

$\gamma_d$  – Peso volúmico seco

## **ABREVIATURAS**

AASHO – American Association State Highway Officials

ASTM – American Society for Testing and Materials

CBR – California Bearing Ratio

COV – Custos de operação de veículos

CUE – Custos de utilização de estrada

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DVI – Detailed Visual Inspection

ERCI – Earth Road Condition Index

HDM – 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

PMDFCI – Plano Municipal de Defesa da Floresta contra Incêndios

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

Para um melhor desenvolvimento socioeconómico de um país, que tem como principal objectivo a melhoria do bem-estar social, é necessário disponibilizar infra-estruturas adequadas ao desempenho da actividade produtiva. Como tal, há que ter em consideração a importância fundamental das instalações de transportes para o processo de produção, circulação e distribuição da riqueza resultante da economia nacional.

As estradas não pavimentadas constituem, no país e no estrangeiro, um número significativo de vias rodoviárias com baixo custo de construção, mas que têm necessidade de frequentes intervenções de conservação periódica e conservação corrente. As estradas não pavimentadas que permitem o fluxo de mercadorias e serviços na zona rural dos municípios, são via de regra oriundas do aproveitamento de trilhos e caminhos existentes, condicionadas a um traçado geométrico carregado de fortes rampas e curvas acentuadas (Carvalho, 1992 referido por Jeonice Techio, 2009) As principais causas das intervenções de conservação periódica e corrente é a falta de drenagem das águas no leito da estrada e a resistência do solo à passagem de veículos, provocando grandes deformações, gerando difícil acesso e desconforto à passagem. Estudos acerca da conservação de estradas não pavimentadas apontam o transporte de sedimentos e os problemas de erosão do solo nas margens de estradas e o conseqüente transporte de materiais para os leitos dos rios como factores de agravamento das condições ambientais e da qualidade dos recursos hídricos (CEPA, 1999 referido por Jeonice Techio, 2009) Tudo isto acontece, porque as estradas não pavimentadas são construídas sem se levar devidamente em conta o relevo, o tipo de terreno, a intensidade da utilização e pela não construção de estruturas que facilitem a drenagem das águas e aumentem a resistência do solo à passagem de veículos. Esta falta de atenção, na construção de estradas não pavimentadas, provoca grandes prejuízos, impedindo ou dificultando o transporte da produção e o deslocamento das pessoas.

Com este trabalho pretende-se desenvolver, numa primeira fase, a caracterização das estradas não pavimentadas e proceder a uma análise da sua importância no contexto nacional e internacional. Numa segunda fase procede-se ao levantamento, compilação e análise dos aspectos mais importantes dos processos construtivos e de dimensionamento estabelecidos a nível nacional e internacional. Por último, faz-se uma análise paramétrica do benefício da utilização de solo melhorado comparativamente à utilização habitual do solo não melhorado no

seu estado húmido, nomeadamente através de ensaios de pista, procedendo-se à análise da influência do melhoramento em termos de previsão da necessidade de conservação periódica e conservação corrente. Neste capítulo segue-se de perto a revisão bibliográfica realizada por Rodrigues, 2015.

Neste trabalho a estrutura é apresentada em cinco partes. No capítulo 2 faz-se uma breve pesquisa sobre o conhecimento e as investigações mais recentes sobre estradas não pavimentadas, tocando levemente na temática dos solos reforçados e tratados quimicamente.

No capítulo 3 segue-se a caracterização/identificação dos materiais utilizados na elaboração dos ensaios para a dissertação, caracterizando a nível geotécnico o solo escolhido para os ensaios e o líquido estabilizante químico também inserido nos ensaios. Ainda se apresentar o plano de ensaios previsto e descrever o procedimento experimental.

O capítulo 4 contém a análise de dados e discussão dos resultados obtidos para cada tipo de ensaio.

Por último, o capítulo 5 apresenta as conclusões mais relevantes e propõe novas ideias para continuação do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Breve introdução sobre a importância das estradas não pavimentadas

As estradas não pavimentadas são estradas de baixo volume e classificadas como estradas de acesso. Este tipo de estradas com um baixo custo de construção, com fluxo de mercadorias essencialmente rurais e florestais, e acessibilidade a determinados locais, desenvolve o poder económico, social e cultural, da zona que atravessa. As estradas não pavimentadas são responsáveis pela interligação entre propriedades rurais e seus vizinhos, servindo também de acesso às vias principais ou à sede de municípios (Figura 2.1).

As estradas rurais, também denominadas agrovias, ou ainda, estradas municipais, de fundamental importância económica e social para as comunidades rurais, representam uma parte significativa da malha rodoviária portuguesa. Essas vias exercem a função de “alimentadoras”, ou seja, através delas é estabelecida a ligação entre as comunidades produtoras e as grandes rodovias pavimentadas, por onde circularão as mercadorias até ao seu destino final. Estradas em condições inadequadas podem iniciar ou agravar processos erosivos em áreas cultivadas, prejudicando a produtividade e, conseqüentemente, a rentabilidade dos produtos rurais, além de afectarem a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos (Pruski et al., 2006 referido por Jeonice Techio, 2009). É de salientar o papel especial na acessibilidade aos espaços rurais, e outras infra-estruturas aos povoamentos e aos produtos florestais. Simultaneamente a rede viária florestal desempenha funções importantes nas diferentes vertentes da protecção civil e do sistema de defesa da floresta contra incêndios, garantindo o acesso para a execução de trabalhos de prevenção e infra-estruturação, para as acções de vigilância, ou para a intervenção a combate de incêndios.

No sector florestal, as estradas não pavimentadas também assumem um papel estratégico, uma vez que o transporte de madeira é feito principalmente através de rodovias, podendo este representar até 50% do custo final da madeira, dependendo das condições das rodovias (Machado C.C., 2003). Outro aspecto de importância relevante é o combate contra aos incêndios florestais. Normalmente, o acesso às grandes áreas florestais dá-se através de estradas secundárias que são maioritariamente estradas não pavimentadas, e, se o acesso se encontra em más condições, pode atrasar e prejudicar a acção dos bombeiros e por conseqüente trazer conseqüências humanas e financeiras. Para isso, existe uma rede viária florestal (RVF), de

acordo com Plano Municipal de Defesa da Floresta contra Incêndios (PMDFCI). Esta rede oferece factores fundamentais para a valorização, protecção e usufruto da sociedade dos espaços silvestres. (DUDF, 2012)

Deste modo, a RVF deve ser cuidadosamente planeada e construída, de forma a garantir e cumprir eficientemente todas as suas finalidades descritas, mas também reduzir os custos de implantação e manutenção deste tipo de vias, e por último reduzir o impacto nas paisagens e nos recursos naturais. (DUDF, 2012)



Figura 2.1 -Estrada não pavimentada

Podem ser definidos três tipos de estradas não pavimentadas (DOT, 1990), podendo também ser uma combinação de terra com cascalho, onde o cascalho só é importante para secções para as quais o material in situ é inadequado:

- **Caminhos de terra** – são estradas de baixo volume de tráfego, que servem de acesso aos espaços rurais. Estas estradas não são obra de engenharia e não permitem, na maioria das vezes, a passagem de veículos em condições de piso molhado. Em condições normais de piso passam apenas 5 ou menos veículos por dia nestas estradas. Estas são normalmente usadas como estradas de acesso local, servidas por proprietários de terrenos e por pequenas comunidades, e em regra não são construídas nem mantidas por uma autoridade rodoviária.
- **Estradas de terra** – estradas com vegetação removida e sem utilização de cascalho na sua construção, sendo o solo ligeiramente compactado através da passagem de veículos. Acontece, por vezes, um reaproveitamento do solo, removido da construção das valetas, para um ajuste final na forma da estrada. Estes tipos de estradas são geralmente construídos 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 constituídas com utilização de cascalho, tendo normalmente em consideração, para a sua concepção, 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, obtendo-se um melhor nível de serviço, embora a rigidez varie consideravelmente com o tempo e dependa muito das actividades de manutenção.

Para uma melhor compreensão da importância das estradas não pavimentadas no mundo, apresenta-se o Quadro 2.1, com a percentagem da rede viária não pavimentada relativa ao total de estradas (km).

Ao analisar o Quadro 2.1, conclui-se que os continentes com mais percentagem de estradas não pavimentadas são África, América do Sul e Oceânia. Ainda assim, dentro de cada continente e sub-continente, existem grandes diferenças de país para país, sendo África e América do Sul os mais homogéneos. Na Oceânia, mais propriamente Austrália, existe uma explicação para a percentagem de estradas não pavimentadas, devendo-se ao facto de ser um país grande havendo a necessidade de se ligar a grandes áreas. Por outro lado, na Europa, esta diferença entre estradas pavimentadas e estradas não pavimentadas é mais notável, sendo mais visível nos países do leste (Estónia, Letónia, Hungria, Macedónia, Polónia), onde a grande percentagem de estradas não pavimentadas justifica a elevada percentagem global na Europa. É de salientar os países nórdicos, tais como a Finlândia, Suécia, Noruega e Escócia, que apresentam uma razoável percentagem de estradas não pavimentadas, devido ao investimento na indústria florestal, na indústria da pesca e no turismo. Já em Portugal, verifica-se que é um dos países com menos percentagem de estradas não pavimentadas, mas mesmo assim é uma percentagem razoável.

Quadro 2.1 - Percentagem de estradas não pavimentadas relativamente ao total de estradas (km) em vários países (CIA@2015)

<i>Continente/ Subcontinente</i>	<i>País</i>	<i>Estradas não pavimentadas (%)</i>	<i>País</i>	<i>Estradas não pavimentadas (%)</i>
<b>África (77%)</b>	África do Sul	79%	Moçambique	79%
	Angola	90%	Nigéria	85%
	Etiópia	86%	Quênia	93%
	Guiné	90%	Serra Leoa	92%
<b>América Central e Caraíbas (30%)</b>	Belize	83%	Haiti	82%
	Costa Rica	74%	Honduras	77%
	Cuba	51%	Nicarágua	86%
	El Salvador	53%	Panamá	58%
<b>América do Norte (39%)</b>	Canadá	60%	México	64%
	EUA	35%	-	-
<b>América do Sul (84%)</b>	Argentina	70%	Paraguai	85%
	Bolívia	85%	Uruguai	90%
	Brasil	87%	Venezuela	66%
	Equador	85%	-	-
<b>Ásia Central (25%)</b>	Rússia	28%	Uzbequistão	13%
	Camboja	94%	Indonésia	43%
<b>Ásia (Este e Sudeste) (22%)</b>	Coreia do Norte	97%	Japão	20%
	Filipinas	74%	Laos	99%
	Mongólia	90%	-	-
<b>Ásia (Sul) (52%)</b>	Afeganistão	71%	Sri Lanka	85%
	Bangladesh	95%	-	-
<b>Europa (44%)</b>	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%
<b>Médio Oriente (33%)</b>	Arábia Saudita	79%	Irão	19%
	Azerbaijão	49%	-	-
<b>Oceânia (61%)</b>	Austrália	57%	Nova Zelândia	34%

A elevada percentagem de estradas não pavimentadas não é sinónimo de pobreza de país. Por exemplo, países como os EUA, Canadá e Japão, que são membros do G7 e, mesmo assim, apresentam percentagens de estradas não pavimentadas elevadas. A Rússia, que faz parte do antigo G8, apresenta também uma percentagem significativa.

Não se pode deixar de realçar, os cerca de 90% referentes ao Uruguai, Paraguai e Brasil, que se devem principalmente ao transporte de produções industriais e agrícolas, e os 35% e 60% relativos aos EUA e Canadá, respectivamente.

Pelos valores do quadro anterior, pode-se concluir que as estradas não pavimentadas são uma realidade importante, até nos países ditos “desenvolvidos” e, como é improvável que haja uma diminuição de percentagem global num futuro próximo, torna-se necessário a discussão e estudo de técnicas/métodos de construção e melhoramento das estradas não pavimentadas.

## **2.2 Elementos e constituição de uma estrada não pavimentada**

### **2.2.1 Constituição da estrada**

O problema da escolha de uma estrada nasce, em linhas gerais, da necessidade ou da conveniência da ligação entre dois locais. Raramente a linha recta que une locais (caminho mais curto) poderá ser tomada como eixo da ligação, em virtude de uma série de condicionamentos existentes na área entre os locais a serem ligados (Pimenta e Oliveira, 2004 referido por Jeonice Techio, 2009)

Os aspectos mais importantes da constituição de uma estrada não pavimentada e que se deve ter em grande consideração são: a geometria, os materiais de construção, e os elementos de drenagem. A concepção de estradas de baixo tráfego, como é o caso das estradas não pavimentadas, apresentam algumas características diferentes das de tráfego intenso (ANMP, (s.d.)):

- Existe pouco desenvolvimento nos aspectos geotécnicos e de tráfego na fase de projecto;
- Os materiais usados são maioritariamente os materiais presentes no local da obra (qualidade e origem diversa);
- Os processos construtivos são variados e maioritariamente “in situ”;

Alguns factores responsáveis pelo estado da superfície ou do leito de qualquer estrada são: material da superfície, intempéries, tráfego e manutenção. Uma boa estrada não pavimentada deve contar com características como as abaixo relacionadas (ANMP, (s.d.)):

- a) Ter largura de via suficiente para acomodar o tráfego da região;
- b) Apresentar resistência suficiente para suportar as cargas transmitidas sem que ocorram deformações excessivas; tal depende fortemente das características do material da superfície do solo, à medida que varia com o teor de humidade;
- c) Apresentar um bom sistema de drenagem para evitar que a acção erosiva da água danifique o subleito e a superfície da via.

### 2.2.2 Geometria

Em termos globais, os aspectos geométricos da estrada são o perfil longitudinal e o perfil transversal. No perfil longitudinal, para assegurar boas condições e viabilidade económica, enquadramento no meio ambiente, bom sistema de drenagem, entre outros, este deve ser o mais adaptado possível ao relevo, evitando sempre utilizar elevadas pendentes longitudinais. Por questões económicas, deve-se dar especial importância aos custos de construção e manutenção (Santos, 2013).

Relativamente ao perfil transversal, este inclui vários elementos, como a via, bermas, valetas e os taludes (Figura 2.2). Na selecção destes elementos no perfil transversal, deve-se ter em consideração a segurança, a capacidade e a economia (ANMP, (s.d.)).

O perfil transversal (Figura 2.2) deve permitir uma circulação segura e deve garantir um sistema de drenagem apropriado e deve ter uma largura entre 4,0 a 7,0 m, dependendo do volume de tráfego: largura de 6 metros permite o cruzamento de dois veículos pesados a velocidade moderada, 5,5 metros permite o cruzamento de um veículo pesado e de um veículo ligeiro, 5 metros permite o cruzamento de dois veículos ligeiros em condições normais, e o cruzamento com um pesado a velocidade reduzida (ANMP, (s.d.)) (Quadro 2.2). A inclinação transversal deve variar entre 3% e 6%. A inclinação transversal deve permitir a drenagem das águas pluviais, sendo, desta forma, o terreno inclinado para ambos os lados a partir do eixo. Caso a superfície da estrada seja composta por argila, as inclinações devem ser ligeiramente superiores às referidas. Estas larguras e inclinações devem ser definidas de forma a permitir uma circulação segura dos veículos (Santos, 2013; ANMP, (s.d.))

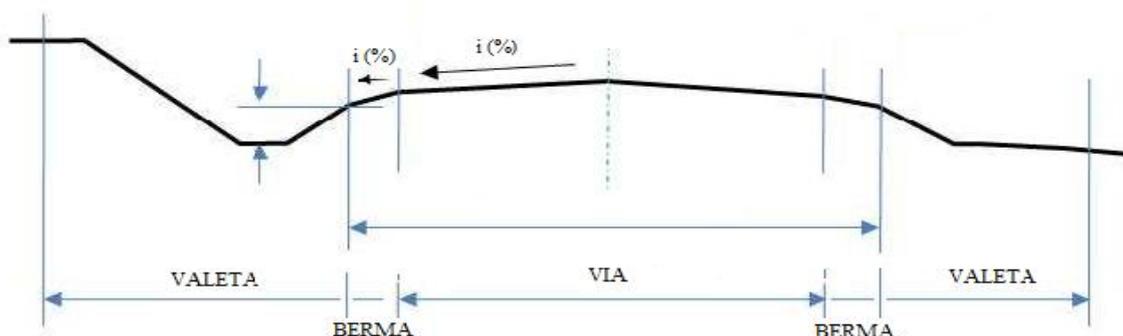


Figura 2.2 - Perfil transversal de uma estrada não pavimentada (Santos, 2013).

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

Largura da via (m)	Permite cruzamento	Largura máxima das bermas (m)
6,0	Entre dois veículos pesados a velocidade moderada	1,25
5,5	Um veículo pesado e de um veículo leveiro	1,00
5,0	Dois veículos ligeiros em condições normais e o cruzamento com um pesado a velocidade reduzida	0,75

### 2.2.3 Solo

Existem três camadas de solo que constituem as estradas não pavimentadas: a camada de desgaste ou plataforma (no caso das estradas não pavimentadas é o próprio solo que constitui a camada), a camada de base e a fundação do pavimento.

Na fundação do pavimento os terrenos subjacentes condicionam o seu comportamento. A sua espessura varia normalmente entre 0.5 e 1.0 m. Nas estradas de baixo tráfego a camada de base é um elemento de elevada importância, pois é a camada que transmite cargas à fundação. Por último, a camada de desgaste, para além de ser importante a nível de suporte de carga, deve estar caracterizada de forma a permitir a circulação de veículos nas devidas condições de conforto e segurança (ANMP, (s.d.)). A 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 (Santos, 2013).

Quando se constrói uma estrada não pavimentada, normalmente o solo usado é o solo local, caso este apresente as características adequadas. Por vezes, o solo local é um solo heterogéneo,

ou seja, a distribuição do solo sobre camadas deve ser feita tendo em conta a qualidade do material. A camada superior deve ser devidamente compactada e utilizado o solo de melhores características de forma a possibilitar a passagem de tráfego nas devias condições (Santos 2013).

A camada superior, ou a camada de desgaste, necessita ter um bom escoamento. Para isso, deve-se considerar uma percentagem mais elevada de finos do que cascalho, pois principalmente em épocas secas, caso haja pequenas quantidades de finos, a superfície não fica em boas condições, tendo em conta que não há agregação o solo (DEP, 2010). Contudo, se a camada superior tiver uma quantidade de finos superior à desejável, poderá dificultar a drenagem e poderão ocorrer deformações na estrada, nas épocas húmidas. Para que não haja superfícies escorregadias (em épocas húmidas), nem formação de poeiras (em épocas secas), é necessário que exista uma boa arrumação entre os materiais aquando a sua compactação. Para isso, o solo com as melhores características deve conter material granular e uma quantidade suficiente de material fino (argila e/ou areia siltosa).

#### **2.2.4 Elementos de drenagem**

Os elementos de drenagem são dos elementos mais importantes para o bom funcionamento das estradas considerando a exposição das estradas não pavimentadas às condições climáticas e ao tráfego, é fundamental garantir que estas possuem um bom sistema de drenagem para que haja uma rápida remoção da água da plataforma de forma a evitar erosão e perda de capacidade de suporte.

As estradas podem apresentar perfis transversais bastante diferenciados, dependendo da situação na qual se encontram, seja em linha recta ou em curvas, em terreno plano ou em encostas, ou mesmo em condições de terrenos baixos com drenagens deficientes. No entanto, qualquer que seja a condição, as características de boa drenagem devem ser sempre observadas, de modo que não ocorra humedecimento excessivo do leito ou que a estrada seja utilizada sob condição de excesso de humidade. A forma como o perfil da estrada se apresenta influencia na maneira como a água irá escoar e, assim, o sistema de drenagem deve ser dimensionado para acompanhar estas variações (Pruski et al., 2006 referido por Jeonice Techio, 2009)

Um sistema de drenagem é constituído tanto por elementos superficiais como subterrâneos (Quadro 2.3), cada um deles com elementos longitudinais e transversais. O objectivo da drenagem superficial é evitar a acumulação de águas, enquanto o objectivo da drenagem subterrânea é evitar a subida do nível freático até ao nível da plataforma.

Quadro 2.3 - Elementos de drenagem de uma estrada não pavimentada (adaptado de Santos, 2013 e Fortunato et al., 2013)

<b>Elementos de Drenagem</b>		
<b>Superficial</b>	Longitudinal	- Valas
		- Valetas
		- Canais (revestidos por): cobertura vegetal enrocamento gabião colchão reno betão*
	Transversal	- Condutas
- Passagens Hidráulicas**		
<b>Subterrâneo</b>	Longitudinal	- Filtros
		- Drenos ( preenchidos com material drenante)
	Transversal	- Condutas
		- Drenos Transversais

\* O recurso ao revestimento em betão pode ser a solução mais eficiente em termos hidráulicos mas é a menos utilizada devido aos custos associados.

\*\* 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.

### 2.2.5 Capacidade de Suporte

A capacidade de suporte de uma estrada é a resistência que o solo tem em deformação sob a acção de cargas. Ao longo do perfil longitudinal das estradas não pavimentadas a capacidade de suporte pode variar consideravelmente. É importante ter em conta as características dos solos encontradas ao longo da estrada. Para isso, recomenda-se a análise do índice CBR (California Bearing Ratio). Mais à frente mostra-se como este índice influencia a construção e reforço das estradas não pavimentadas (ANMP, (s.d.)).

### 2.3 Danos Comuns

Existem dois tipos de danos: os danos provocados por factores externos e os danos estruturais. Nas estradas não pavimentadas, comparando com as estradas pavimentadas, são mais propícias a danos provocados por factores externos, como tráfego rodoviário, a falta/pouca/inadequada manutenção e a precipitação. No que toca a danos estruturais, por vezes, a estrutura da estrada é incapaz de suportar o tráfego em condições adequadas, devido aos problemas relativos ao tipo de solo, à geometria da estrada ou ao sistema de drenagem. É possível a existência de defeitos funcionais na superfície da estrada, resultado da má selecção de processos construtivos ou de materiais.

Os danos mais comuns são (Quadro 2.4): rodeiras, poeiras, irregularidades, buracos, desagregação do solo, erosão, secção transversal e drenagem lateral inadequadas. Uma secção transversal inadequada trata-se de uma superfície sem inclinação transversal suficiente para a drenagem das águas. É um problema funcional identificável pela erosão associada à intensidade de precipitação e pelo escoamento da água ao longo da superfície de rolamento (Silva, 2009). Segundo Nunes (2003), os tipos de secção transversal inadequada mais frequente são: secção em calha, secção abaulada e encaixada e secção mista, ilustradas na Figura 2.3.

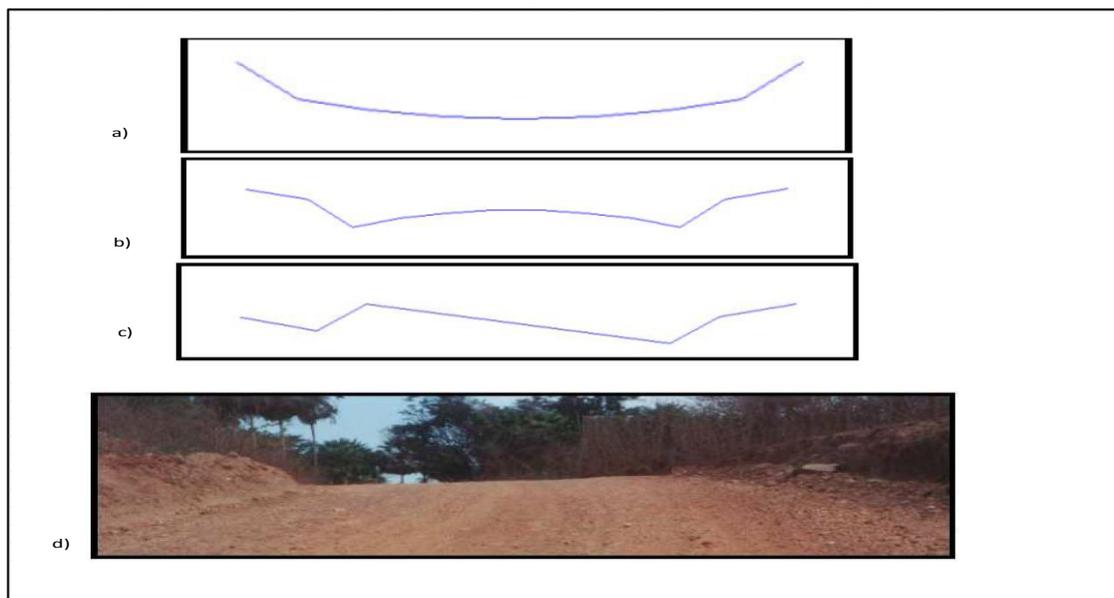
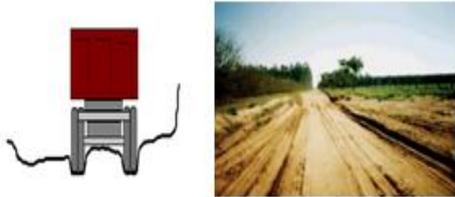
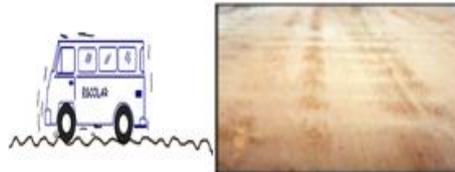
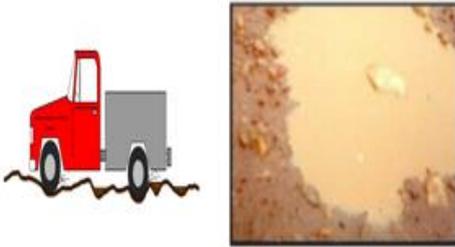


Figura 2.3 - Secção transversal inadequada: a) secção transversal em calha b) secção transversal abaulada e encaixada c) secção transversal mista d) Estrada não pavimentada com secção transversal mista (Nunes, 2003)

Quadro 2.4 - Danos comuns (adaptado por Santos, 2013; Santos, 1988; DOT, 1990)

Danos Comuns			
Tipo	Exemplo	Descrição	Causa
Rodeiras		São depressões longitudinais ao longo da estrada que provocam uma deformação permanente na camada de desgaste devido à compressibilidade do solo provocada pela passagem sucessiva das rodas dos veículos	falta de suporte do solo de fundação; ausência/deficiência do sistema de drenagem;
Poeiras		Forma-se uma nuvem de poeira à passagem de veículos gerando um problema funcional, podendo colocar em risco a segurança rodoviária e reduzir a vida útil dos veículos. No que toca a questões ambientais, o excesso de poeira provoca poluição do ar e são indesejáveis em termos de saúde e conforto. Verifica-se um agravar deste problema em épocas secas e em solos mais argilosos que arenosos.	perda de fração fina do solo à superfície provocada pela velocidade de circulação dos veículos ou pelas propriedades dos materiais da estrada (ex.: teor de humidade)
Irregularidades		Semelhante às rodeiras mas com ondulação no sentido transversal	movimentos vibratórios da passagem de veículos; falta de compactação; baixo índice de plasticidade do material
Buracos		É a expulsão contínua de partículas sólidas da superfície aquando da passagem de veículos sobre um local onde ocorre acumulação de água devido à drenagem superficial inadequada	deformação da camada de desgaste; evolução da fissuração nas estradas devido ao excesso de plasticidade do solo; fraca compactação; deficiente geometria da estrada; suporte na fundação inadequado; má qualidade do material; manutenção e drenagem inadequada;
Desagração do solo		Formação de cordões laterais e no centro da via provocado pela passagem de veículos	mais comum em solos argilosos, com inclinações acentuadas, onde o material granular acrescentado ao solo não foi devidamente compactado; em superfícies planas onde há escassez de material fino ligante;
Erosão		Surgem em forma de sulcos onde os solos têm fraca resistência à erosão e, sob acção da chuva, evoluem para grandes ravinamentos	falta ou deficiência de um sistema de drenagem adequado

Os níveis de severidade e extensão da secção transversal inadequada 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;

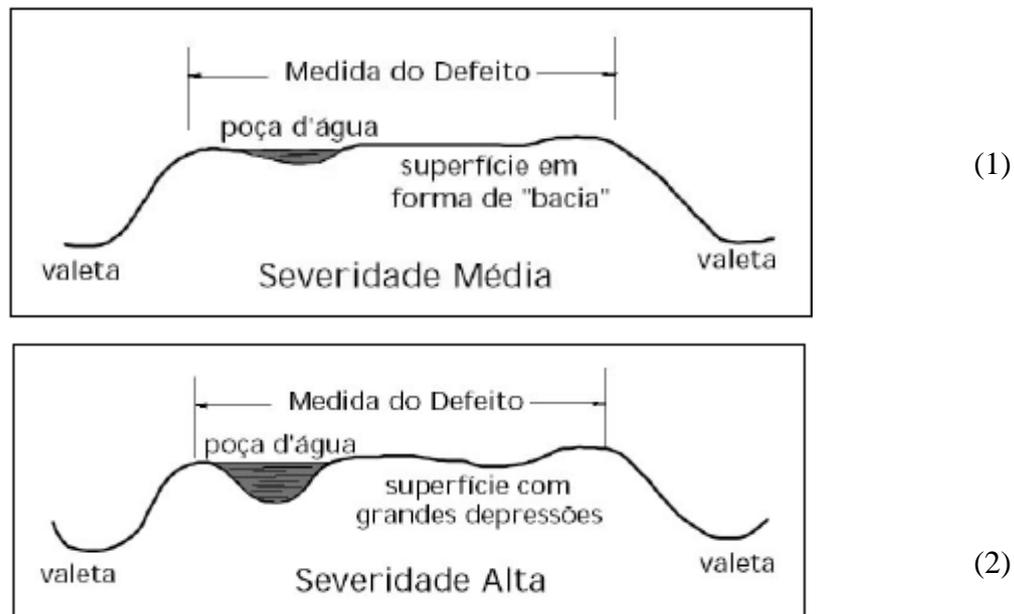


Figura 2.4 - Secção transversal com severidade média (1) e com severidade alta (2) (ODA, 1995)

A drenagem inadequada é problema funcional muito comum, uma vez que cerca de 80% dos problemas existentes nas estradas estão relacionados com a drenagem inadequada (MDEP, 2001). A drenagem inadequada consiste na acumulação de água na plataforma devido à não existência de sistema de drenagem, ou à falta de manutenção dos dispositivos de escoamento da água. Quando a estrada está coberta de vegetação ou cheia de entulho, impossibilita o escoamento das águas para a valeta e ajuda a sua falta de manutenção, acabando por provocar empoçamento e erosão da borda da estrada. A drenagem também pode ser classificada em níveis de severidade, sendo baixa nos casos em que existe baixas quantidades de poças de águas e ausência de vegetação e/ou entulho, elevada quando as poças de água começam a ser uma constante e há muita acumulação de vegetação e/ou 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 quantidade 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).

## **2.4 Características técnicas da estrada**

Há vários factores que influenciam o estado da superfície da estrada. Uma estrada para ser considerada num bom estado tem que ter, obrigatoriamente, a camada de desgaste ou plataforma em bom estado. Os factores que influenciam a superfície da estrada são o tipo de solo, tráfego, manutenção e os fenómenos meteorológicos (erosão).

Contudo, é importante que a superfície da estrada apresente uma boa resistência para que possa suportar as cargas exercidas pela passagem de veículos sem que resultem deformações excessivas. Essa resistência resulta maioritariamente das características do material de superfície e da resistência que o solo oferece às variações do teor de humidade. Um bom sistema de drenagem é fundamental para a evitar possíveis fenómenos de erosão.

### **2.4.1 Capacidade de suporte**

Como foi referido anteriormente, a capacidade de suporte é a resistência que o solo tem à deformação sob a acção de cargas. Ao longo do perfil longitudinal da estrada, a capacidade de suporte vai variar consideravelmente tendo em conta as várias características dos solos encontradas. A capacidade de suporte é avaliada através do índice de CBR (California Bearing Ratio) (ANMP, (s.d.)). 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). Quando o índice de CBR em estradas não pavimentadas é inferior a 10%, recomenda-se o uso de reforços (Neves, 2013).

Nos casos em que o índice CBR é baixo, a falta de capacidade de suporte provoca algumas consequências, como formação de rodeiras, ondulações transversais ou formação de lamas, caso haja fortes precipitações. Sendo assim, quanto maior for a capacidade de suporte, maior será a resistência a processos erosivos ou desgastes provocados pela passagem de veículos (Santos 2013). A maior causa para a fraca/ ausência da capacidade de suporte é a baixa compactação ou material inadequado na fundação da estrada e/ou camada de reforço (Santos et al., 1988).

Tendo em conta a variabilidade de solos e a importância da capacidade de suporte de uma fundação para o dimensionamento dos pavimentos, foram estabelecidas as classes que constam no Quadro 2.5:

Quadro 2.5 - Classes de Terrenos de Fundação (retirado de ANMP, (s.d.))

Classe	CBR (%)	Tipo de solo	Descrição	Reutilização		
				PIA	Corpo	PSA
S 0	< 3	OL	siltos orgânicos e siltos argilosos orgânicos de baixa plasticidade (1)	N	N	N
		OH	argilas orgânicas de plasticidade média a elevada; siltos orgânicos. (2)	N	P	N
		CH	argilas inorgânicas de plasticidade elevada; argilas gordas. (3)	N	P	N
		MH	siltos inorgânicos; areias finas micáceas; siltos 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	siltos inorgânicos e areias muito finas; areias finas, siltosas ou argilosas; siltos 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 - admissível; N - não admissível ; P-possível.

PIA - parte inferior do aterro

PSA - parte superior do aterro

Os materiais granulares, como areias e cascalho, apresentam uma boa compactação, sendo os mais indicados uma vez que conferem uma melhor capacidade de suporte à fundação (Santos et. al, 1988).

#### 2.4.2 Geometria do traçado, aderência e drenagem de águas

Quando uma estrada apresenta irregularidades na superfície, ou seja, buracos, materiais soltos, ondulações transversais, entre outras coisas, tal deve-se à falta ou más características de drenagem ou/e má geometria do traçado. No que diz respeito às más condições de aderência, esta está relacionada com as condições de atrito, ou seja, quando uma estrada tem boas condições de aderência, não acontecem fenómenos do tipo derrapagem de veículos (Santos et. al, 1988). A melhor solução para que uma estrada apresente boas condições de escoamento, aderência e geometria, é incluir material granular (areia e cascalhos) e um material ligante, como a argila, no solo que a constitui de forma a aglutinar os grãos do material granular e, por fim, compactar a mistura. Ao utilizar esta solução, evitamos uma grande parte dos problemas relacionados com este tipo de condições, como buracos generalizados, materiais granulares soltos, solo escorregadio, entre outros (Santos et. al, 1988).

#### 2.5 Métodos de avaliação das condições de circulação da estrada

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

O facto de existir pouco ou falta de manutenção de estradas não pavimentadas por um longo período de tempo, origina problemas, que podem chegar à incapacidade de circulação de pessoas e mercadorias. É, por isso, de grande importância, avaliar e planear as actividades a serem levadas a cabo para a manutenção da integridade estrutural e funcional das estradas não pavimentadas. Importantes são também os danos ambientais resultantes da erosão do solo que, transportados pela chuva, são levados e depositados em áreas agrícolas, juntamente com os químicos depositados na estrada ao longo do tempo.

Como as situações são diferentes de país para país, também os métodos de avaliação de danos de estradas variam entre países. Assim, é possível encontrar cinco tipos de avaliação(Quadro 2.6): o *Gravel Paser (Pavement Surface Evaluation and Rating) Manual – GPM*, o *Detailed Visual Inspection (DVI) /Road Condition Survey (RCS)*, o *Unsurfaced Road Condition Survey*

(URCI), o *Road Surface Management System* (RSMS) e o *Earth Road Condition Index* (ERCI) (Ferreira, 2007).

Quadro 2.6 - Comparação dos métodos de avaliação das condições das estradas (adaptado de Ferreira, 2007)

Métodos	Origem	Defeitos Avaliados	Níveis de Severidade	Forma de Medição da Densidade	Escala	Classificação
GPM	EUA	Ver Quadro 2.7	Para algumas classificações	Para algumas classificações	[1 - 5]	Péssimo - Excelente
RCS/DVI	Europa		Baixo, Médio, Alto	<10%; 10%-50%; >50%	[1 - 5]	Péssimo - Excelente
URCI	EUA		Baixo, Médio, Alto	Nomogramas	[0 - 100]	Péssimo - Excelente
RSMS	EUA		Baixo, Médio, Alto	<10%; 10%-30%; >30%	[0 - 100]	Péssimo - Excelente
ERCI	Egipto		Suave e Grave	Ocasional, frequente, extenso	[0 - 100]	Péssimo - Excelente

O GPM é 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. O DVI / RCS é um método utilizado no Reino Unido e inclui duas fases: RCS e DVI. Relativamente aos 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 objectiva, ou seja, passa pelo registo tipo, da densidade e da severidade do defeito e consequente implementação das medidas para a minimização do mesmo. O URCI é utilizado nos EUA e mede os defeitos da superfície da estrada (indicados em 2.3) através de uma inspecção feita à estrada, dentro de um veículo que circula nessa estrada. O inspector responsável aponta os danos encontrados ao longo da via e classifica-os. Esta inspecção é feita uma vez em cada estação do ano. O RSMS é o 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. Quanto ao ERCI, este é usado no Egipto. Todos estes métodos pressupõem a avaliação de defeitos, que se encontram analisados no Quadro 2.7, de acordo com o respectivo método referido anteriormente.

Quadro 2.7 - Defeitos avaliados em cada método de avaliação (adaptado de Ferreira, 2007)

Métodos		GPM (EUA)	RCS / DVI (Europa)	URCI (EUA)	RSMS (EUA)	ERCI (Egipto)
Defeitos Avaliados	Secção transversal inadequada	X	X	X	X	X
	Buracos	X	X	X	X	X
	Rodeiras	X	X	X	X	X
	Ondulações	X	X	X	X	
	Drenagem lateral inadequada	X		X	X	
	Perda de agregados	X	X	X	X	
	Poeiras	X	X	X	X	
	Espessura do cascalho	X	X			
	Superfície saturada					X
	Falha e erosão de aterro na estrada					X
	Falha no muro de contenção					X
	Altura da superfície					X

De salientar, alguns métodos de avaliação desenvolvidos nos países nórdicos, como a Suécia, em que a análise das condições das estradas é feita utilizando 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 projecto, HDM (Highway Development and Management), 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 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.

## 2.6 Aspectos económicos

A avaliação económica relaciona o impacto que as condições da estrada provocam no custo e conforto dos utentes, por isso, a sua grande importância. Quando se trata de melhoria ou manutenção das condições da estrada, é necessário sempre ter em consideração alguns aspectos económicos.

Na avaliação económica é medido o benefício económico de investimentos alternativos e soluções de manutenção, que dizem respeito a alternativas de projecto, de forma a assegurar uma distribuição óptima 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 reabilitação para estas estradas (Ferreira, 2014).

É possível classificar os níveis de qualidade que a estrada oferece pelo tipo de superfície, qualidade de acesso da estrada e qualidade/conforto da viagem. Através do Quadro 2.8, consegue-se relacionar o nível de qualidade da estrada com as qualidades de acesso da estrada e da viagem a que os utentes estão sujeitos. Ao analisar o quadro, observa-se o aumento da qualidade/conforto da viagem, com o aumento do nível de qualidade da estrada e da qualidade de acesso à estrada.

Esta qualidade de viagem, ou seja, se a viagem é feita em conforto, é avaliada através da rugosidade que a estrada apresenta, ou seja, através das irregularidades. Ora, a rugosidade é um fenómeno que varia consoante a estação do ano, conforme se pode analisar o Quadro 2.8, ou seja, na estação húmida a rugosidade é maior que na estação seca, interferindo com a qualidade e conforto da viagem. Uma vez que na estação húmida, o solo fica mais saturado, ficando menos resistente e mais deformável, por vezes torna-se quase impossível a circulação de veículos.

Quadro 2.8 - Níveis de qualidade analíticos para a qualidade de estradas pavimentadas e não pavimentadas (adaptado de Archando - Callao, 2004)

Nível de qualidade da estrada	Qualidade de acesso da estrada				Qualidade de viagem	
	Estação seca		Estação húmida		Rugosidade = Irregularidades (PSR/IRI)	
	Veículo 4 rodas	Veículo 2 rodas	Veículo 4 rodas	Veículo 2 rodas	Estação seca	Estação húmida
<b>Não pavimentada com acesso não confiável</b>	Não confiável	Não confiável	Não confiável	Não confiável	Não aplicável	Não aplicável
<b>Não pavimentada muito pobre</b>	Normal	Difícil	Difícil	Difícil	22	25
<b>Não pavimentada pobre</b>	Normal	Normal	Difícil	Difícil	17	25
<b>Não pavimenta razoável</b>	Normal	Normal	Normal	Difícil	13	22
<b>Não pavimentada boa</b>	Normal	Normal	Normal	Normal	10	10
<b>Não pavimentada muito boa</b>	Normal	Normal	Normal	Normal	7	7
<b>Pavimentada muito pobre</b>	Normal	Normal	Normal	Normal	12	12
<b>Pavimentada pobre</b>	Normal	Normal	Normal	Normal	8	8
<b>Pavimentada razoável</b>	Normal	Normal	Normal	Normal	4	4
<b>Pavimentada boa</b>	Normal	Normal	Normal	Normal	3	3
<b>Pavimentada muito boa</b>	Normal	Normal	Normal	Normal	2	2

Quanto maior a rugosidade da estrada, mais afectada é a circulação de veículos, o desgaste dos veículos e as manobras dos veículos, podendo ser quantificada através do índice *Present Serviceability Rating* (PSR) (referido em 2.5) ou pelo *International Roughness Index* (IRI). Através da Figura 2.5 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 posteriormente melhor manutenção depende e está a cargo das autoridades rodoviárias ou dos proprietários das estradas. Em Portugal, a autoridade rodoviária faz parte das Infra-estruturas de Portugal.

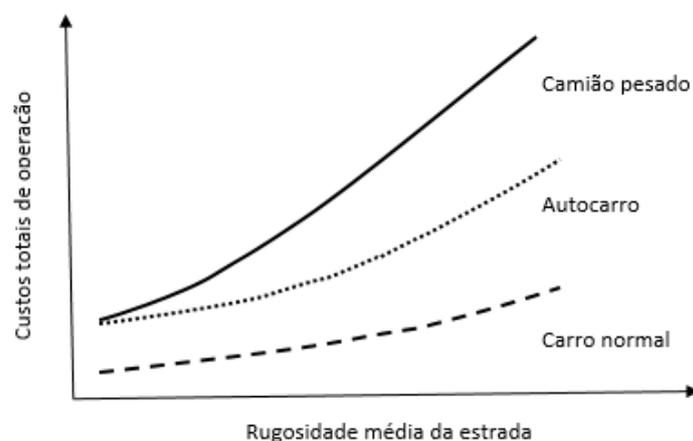


Figura 2.5 - Relação entre a rugosidade média da estrada e o total de custos operacionais de veículos (adaptado de DOT, 1990)

No Quadro 2.9 está relacionado o custo relativo dos utentes da estrada e as autoridades rodoviárias. Compara-se a relação entre o nível de qualidade da estrada com os custos dos utilizadores da estrada (CUE), custos de operação de veículos (COV), velocidade de veículos e com as estações seca e húmida. Ao analisar o Quadro 2.9, verifica-se que o aumento da qualidade do tipo de estrada (pavimentada e não pavimentada), bem como da velocidade a que os veículos podem circular, os custos associados aos veículos e aos utilizadores diminuem.

Quadro 2.9 - Velocidades dos veículos, COV e CUE, para estação seca e estação húmida (Archando-Callao, 2004)

Nível de qualidade da estrada	Estação seca			Estação húmida		
	Velocidade (Km/h)	COV (\$/Km)	CUE (\$/Km)	Velocidade (Km/h)	COV (\$/Km)	CUE (\$/Km)
<b>Não pavimentada muito pobre</b>	28	0,515	0,624	25	0,56	0,684
<b>Não pavimentada pobre</b>	37	0,439	0,523	25	0,56	0,684
<b>Não pavimenta razoável</b>	48	0,375	0,441	28	0,515	0,624
<b>Não pavimentada em boas condições</b>	61	0,33	0,381	61	0,33	0,381
<b>Não pavimentada em muito boas condições</b>	78	0,288	0,328	78	0,288	0,328
<b>Pavimentada muito pobre</b>	52	0,36	0,42	52	0,36	0,42
<b>Pavimentada pobre</b>	72	0,301	0,345	72	0,301	0,345
<b>Pavimentada razoável</b>	84	0,247	0,284	84	0,247	0,284
<b>Pavimentada boa</b>	85	0,234	0,271	85	0,234	0,274
<b>Pavimentada muito boa</b>	85	0,23	0,267	85	0,23	0,267

No Quadro 2.10, observa-se os custos de manutenção para manter o nível de qualidade da estrada

Quadro 2.10 - Custos de investimento de manutenção do nível de qualidade de uma estrada ( $\times 1000\$/\text{km}$ ) (Archando-Callao, 2004)

De nível de qualidade da estrada	Para nível de qualidade da estrada					
	Não pavimentad a muito pobre	Não pavimentad a pobre	Não pavimentad a razoável	Não pavimentada boa	Não pavimentad a muito boa	Pavimentad a razoável
Não pavimentada muito pobre	5	10	30	95	155	255
Não pavimentada pobre		5	25	90	150	220
Não pavimentada razoável			20	85	145	215
Não pavimentada boa				65	125	195
Não pavimentada muito boa					60	130
Pavimentada razoável						70

Para além do que foi já explicado anteriormente, existem mais dois tipos de análise para a avaliação económica, que são a alternativa-zero e a análise sensitiva. Por vezes, após uma análise dos aspectos económicos, define-se como alternativa de não executar nenhum projecto 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. Na análise sensitiva é possível saber como é que os resultados são influenciados pelas projecções 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 e tratamento de estradas não pavimentadas

É usual a utilização de solos ou cascalhos para a construção de estradas não pavimentadas, mas também podem ser utilizadas outras soluções como a inclusão de ramos, troncos, geossintéticos, líquidos estabilizantes, etc. A utilização destas soluções dependerá da localização da estrada ou da necessidade de melhoramento da fundação (Santos, 2013). Nesta dissertação iremos abordar e analisar o tratamento de estradas não pavimentadas com líquido estabilizante químico conforme descrito mais à frente.

No caso em que as estradas não pavimentadas se encontram construídas sobre uma fundação pobre/fraca, podem ocorrer grandes deformações, o que pode levar, a custos adicionais de manutenção ou até mesmo à interrupção do tráfego em más condições. A solução do uso de geossintéticos/líquidos estabilizantes quimicamente para reforço/tratamento de solos com esta flexibilidade tornou-se como uma tecnologia viável, permitindo um aumento de vida útil da estrada, reduzindo a espessura da camada de base sem alterar a resistência do solo em repetição de carga (adaptado Subaida et al, 2009).

### 2.7.1 Geossintéticos

Os geossintéticos podem ser utilizados para reforço de estradas não pavimentadas e para plataformas de trabalho sobre solos moles (Figura 2.6) (IGS Portugal@). São definidos como produtos industrializados poliméricos (sintéticos ou naturais), cujas propriedades contribuem para melhorias geotécnicas. Quando bem especificados, os geossintéticos podem cumprir uma ou mais das funções seguintes: reforço, filtração, drenagem, protecção, separação, controle de fluxo (impermeabilização) e controle superficial (Vidal, 2002) (Figura 2.7). Actualmente, 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 2.11 estão apresentadas as diversas funções associadas a cada tipo de geossintético.

Quando comparado com estradas não pavimentadas não reforçadas, a colocação do reforço de geossintético apresenta as seguintes vantagens (IGS Portugal):

- a) Reduz a altura do aterro;
- b) Reduz a deformação lateral do aterro;
- c) Gera uma distribuição de tensões mais uniforme;
- d) Aumenta a área sobre o incremento de tensões verticais;
- e) Reduz a deformação vertical devida ao efeito da membrana;
- f) Aumenta a vida útil da estrada;
- g) Necesita de menos manutenção;
- h) Reduz o custo de operação e operacionalidade da estrada;

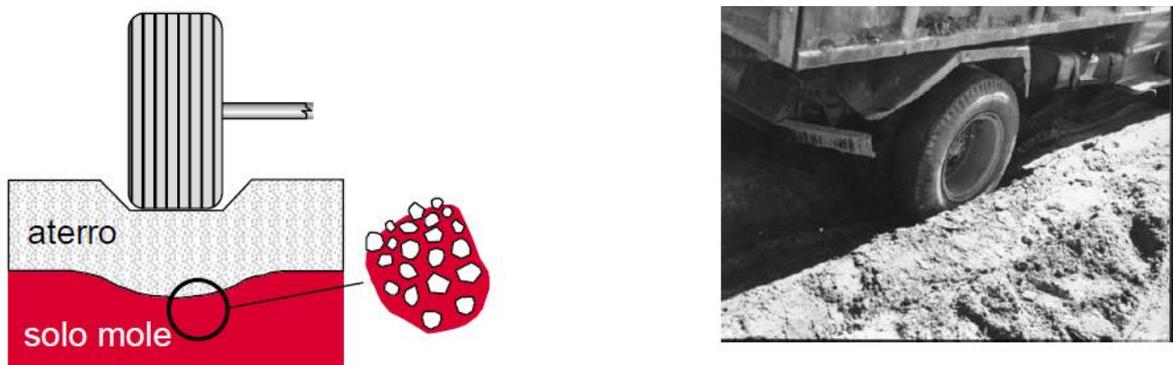


Figura 2.6 - Mecanismos típicos de degradação em estradas não pavimentadas em solos moles (IGS Portugal @)

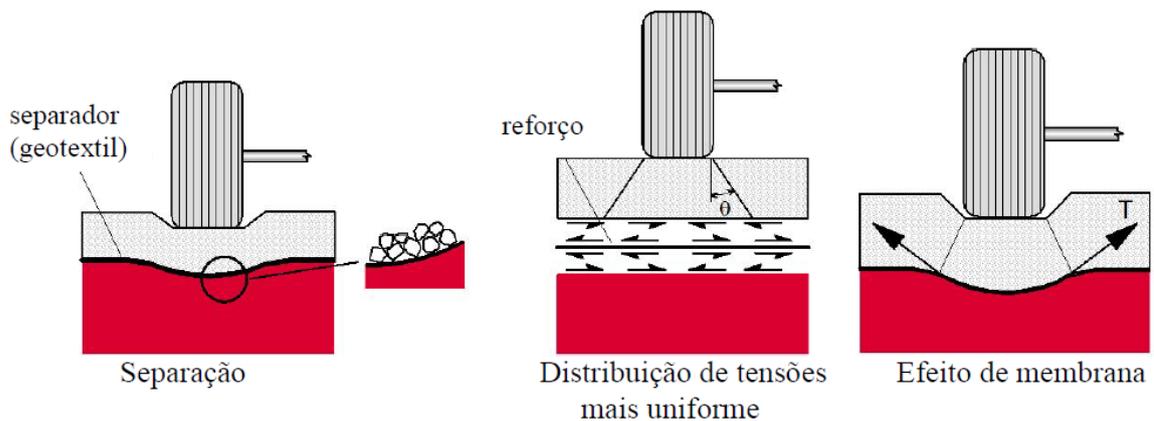


Figura 2.7 - Influência do reforço de geossintético no comportamento de estradas não pavimentadas (IGS Portugal @)

Quadro 2.11 - As principais funções de cada tipo de geossintético (adaptado de Barbosa, 2010)

	Funções Características
--	-------------------------

Tipo de geossintético	Reforço	Separação	Drenagem	Filtração	Protecção	Barreira
<b>Geotêxtil tecido</b>	X	X	X		X	
<b>Geotêxtil não - tecido</b>	X	X	X	X	X	
<b>Geogrelha</b>	X					
<b>Georrede</b>			X			
<b>Geodrenos</b>			X	X		
<b>Geomembranas</b>		X				X
<b>Geocélulas</b>	X				X	
<b>Geocomposto</b>	X		X	X	X	X

Conforme a profundidade dos sulcos aumenta, a deformação do geossintético providencia maior nível de reforço devido ao efeito de membrana. A componente vertical da força de tracção do reforço reduz o aumento da deformação vertical do aterro. Vários investigadores mostraram que a mesma profundidade dos sulcos de uma estrada reforçada é atingida ao fim de um número de repetições de carga (intensidade de tráfego) maior do que no caso de esta não ser reforçada (Figura 2.8). Isto conduz a uma maior vida útil e a menor manutenção.

Um material de reforço que seja drenante vai acelerar a consolidação dos solos moles, aumentando a sua resistência. A drenagem dos solos moles pode ser conseguida com a aplicação de um geotêxtil, uma geogrelha com geotêxtil ou um geocompósito, como elemento de reforço. O aumento da resistência da camada superior da fundação de solos moles será benéfico se a estrada for futuramente pavimentada, reduzindo os custos e as deformações do pavimento. (Texto adaptado do IGS Portugal@)



Figura 2.8 - Influência do geossintético na resistência do solo mole (IGS Portugal @)

Na literatura estão disponíveis vários métodos de dimensionamento, incluindo métodos bastante simples que fazem uso de ábacos para pré-dimensionamento. Estes métodos utilizam os parâmetros do solo e do material de reforço habitualmente necessários para o dimensionamento em condições normais. Alguns ábacos foram desenvolvidos pelos fabricantes especificamente para o pré-dimensionamento dos seus produtos

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

- Escavações e substituição com material de aterro seleccionado;
- 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 significativos e ainda reduzir em 50% as emissões de CO<sub>2</sub> durante a construção (TIL, 2012). Desta forma, todas as vantagens tornam este tipo de reforço muito aliciente 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<sub>2</sub> (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 tracção, ou seja serve predominantemente como reforço (Vidal, 2002).

As vantagens do uso deste tipo de reforço são as restrições ao movimento lateral do solo e o efeito membrana no geossintético, conforme descrito na Figura 2.7, que ao actuarem em conjunto, aumenta a capacidade de suporte de solo e por consequente, aumenta a resistência à deformação e ao afundamento.

A restrição ao movimento lateral do solo acontece, devido ao atrito que existe entre o solo do aterro e a geogrelha. O efeito membrana ocorre, devido à deformação gerada pela movimentação da camada de aterro provocada pela passagem de veículos. Mesmo sendo uma deformação menor com a introdução da camada de reforço, esta encontra-se submetida a uma acção combinada das forças de tracção no reforço e a sua curvatura, que origina a redução da tensão vertical transferida à fundação (Góngora, 2011)

### 2.7.2 Líquido estabilizante químico

Ao longo dos anos surgiram algumas alternativas ao uso do geossintético para melhor o comportamento de estradas não pavimentadas. As mais recentes baseiam-se na aplicação de um líquido estabilizante químico no solo, no seu estado húmido, de forma a evitar deformações com a passagem de veículos (@Wix). Um estabilizante químico de solos faz alterar as propriedades físico-químicas de modo que o material se torne aproveitável para a aplicação em engenharia, criando condições para resistir a carregamentos e intempéries tornando-o impermeável e aplicável na construção de bases de pavimentos urbanos e rodoviários (@Ecolopavi).

Embora haja vários líquidos estabilizantes, nem todos têm o mesmo composto orgânico. Nesta dissertação, vão ser estudados dois tipos de líquidos, um líquido proveniente de Angola (PURE CRETE) e outro líquido proveniente do Brasil (ECOLOPAVI). As recomendações de utilização destes líquidos estão indicadas no quadro 3.4.

### 2.7.3 Pure Crete

Trata-se de composto orgânico semelhante a proteínas e actua como catalisador para auxiliar a ligação molecular e a interacção no solo, reforçando uma ocorrência natural. As enzimas

alteram as propriedades do material do solo produzindo uma base sólida na camada superior da estrada.

Ao aumentar (Figura 2.9) a taxa de compactação de 90% para 105%, reduz o esforço da mesma. É um método eficaz para estabilizar estradas, lagoas, aterros, etc., pois aumenta a capacidade de suporte de carga do solo, e reduz a plasticidade e permeabilidade.



Figura 2.9 - Influência do geossintético na resistência do solo mole (IGS Portugal @)

Para saber qual a caracterização do solo, é necessário realizar os ensaios requeridos pela marca previamente (@Wix):

- Granulometria
- Limites de plasticidade
- Densidade de Partículas
- Compactação
- CBR

Ao nível de poupança, existem alguns factos comprovados como:

- Utiliza solo nativo sem inertes adicionais
- A forma líquida concentrada elimina a necessidade de armazenamento em massa de grandes quantidades de materiais
- Não corrói o equipamento
- Facilidade e curta duração de tempo para construir uma estrada representam uma grande poupança de mão-de-obra, combustível e equipamento
- Reduz o tempo de desvio de trânsito e o fecho de intersecção de sistemas rodoviários
- Reduz a manutenção
- Elimina abatimentos na base da estrada

De seguida, encontra-se a Figura 2.10, onde se faz uma comparação entre a construção de uma estrada nova, com e sem Pure Crete, ao nível de poupança e eficácia.

<b>COMPARAÇÃO</b>	
<b>COM PURE CRETE</b>	<b>SEM PURE CRETE</b>
Estrada Nova : 1 Km em 2 - 3 dias	Estrada Nova : 1 Km em 3 - 4 Semanas
Líquido concentrado facilmente armazenado	Necessita de grandes áreas de armazenamento especializado
Não tóxico, não corrosivo e não explosivo	Requer um tratamento e equipamento especial
Não necessita de inertes adicionais	Necessita de inertes adicionais
As estradas podem ser usadas antes de serem revestidas de asfalto ou camada final	A ação da água facilmente causa ravinas, arrastamento de inertes e buracos
A base da Estrada é 6 a 8 vezes mais forte e segura segundo os mais altos padrões de carga	A base da Estrada terá de ser revestida imediatamente com asfalto ou a camada final para utilização

Figura 2.10 - Comparação de construção de uma estrada nova (@Wix)

No que toca à garantia (sem camada de asfalto), Pure Crete dá uma garantia total de 100%, durante 8 anos em estrada feita com Pure Crete e com pessoal certificado.

Existem alguns benefícios a ter em conta na aplicação de Pure Crete, tais como:

- Facilita o desenvolvimento das redes viárias (Principais e Secundárias do país)
- Utiliza mão-de-obra local
- Pode ser utilizado com temperaturas frias ou muito quentes, desde uma tempestade florestal para o deserto, ou do fundo de um lago a uma barragem de terra
- Não é prejudicial para humanos, animais, peixes, água ou vegetação sempre que utilizado em condições normais, sendo totalmente biodegradável
- Armazenável até 49°C (120°F). O congelamento não é prejudicial ao produto

Outro benefício será a adaptação do produto ao solo. Pure Crete adapta-se às mais diversas condições de solo e não requer um equipamento ou procedimentos de aplicações especiais. Dentro da profundidade recomendada (até 40 cm), as estradas irão manter uma superfície dura e resistente à ruptura que requer uma manutenção mínima e frequentemente sem necessidade de um “revestimento final” por um largo número de anos (@wix).

### 2.7.4 Ecolopavi

O estabilizante de solos Ecolopavi é um sal químico de origem orgânica, líquido, totalmente solúvel em água que actua como um catalisador, promovendo e facilitando a troca iónica, permitindo maior coesão entre partículas finas do solo, impermeabilizando-as (Figura 2.11). Sua forte acção aglutinante é devido ao fenómeno da troca de base, eliminando o campo electromagnético que se forma no contorno das partículas, que ioniza as moléculas da água, fazendo-as aderir fortemente à superfície, formando a camada de água adsorvida, que por sua vez aumenta a distância entre as superfícies, diminuindo a força atractiva.



Figura 2.11 - Comparação de uma estrada antes e depois da aplicação de Ecolopavi em Manaus, Brasil (@Ecolpavi – Slideshare)

Antes de ser adicionado o líquido Ecolopavi ao solo, tem que se tratar o solo quimicamente, deixando-o neutralizado ou quimicamente estável, de forma a reagir bem quando misturado com o líquido Ecolopavi. Os reagentes vão alterando, consoante a predominância do tipo de solo em causa (Quadro 2.12).

Quadro 2.12 - Tipo de reagentes para cada tipo de solo (@Ecolopavi-Slideshare)

Solo predominante	Reagentes	Percentagem de reagente em relação ao peso do solo seco (%)
Areno-argiloso	Cimento Portland	2
Argiloso	Cal hidratada	2
Arenoso	Sulfato de alumínio	2

Para saber qual o tipo de solo em causa, ou a sua caracterização, é necessário realizar os ensaios requeridos pela marca previamente:

- Granulometria
- Limites de Plasticidade
- Densidade de Partículas
- Compactação

As primeiras vantagens de pavimentos estabilizados com Ecolopavi são (Texto adaptado @Ecolopavi – Slideshare):

- O solo das camadas do pavimento estabilizado (camada de desgaste) é bastante reduzido no transporte e pode ser solo nativo
- Depois de estabilizados pode ser remexido em qualquer altura pois não perde as propriedades adquiridas
- Aquando a mistura com os reagentes cal ou cimento, não são precisos cuidados especiais, devido à sua pequena percentagem
- Os equipamentos a serem utilizados para a execução de camadas de solo estabilizado quimicamente são os mesmos utilizados para terraplanagens ou para conservação de estradas rurais
- O acréscimo de custo de conservação de estradas com camadas de solo estabilizado é o mínimo, ou quase inexistente
- Os solos estabilizados adquirem grande trabalhabilidade, tornando-se facilmente compactáveis
- Solos estabilizados têm reduzida absorção de água, ascensão capilar, poder de sucção e expansibilidade, com um proporcional aumento de CBR
- A utilização do estabilizante químico de solos minimiza a agressão ao meio ambiente, por tornar desnecessária a exploração de jazidas de outros materiais

## 3 DESENVOLVIMENTO LABORATORIAL: MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Breve Introdução

Neste capítulo, tendo em conta a diversidade de características de solos encontrados em redes rodoviárias, e estes apresentarem comportamentos geotécnicos muito diferentes, foi necessário proceder à sua caracterização geotécnica. Por isso, são abordados os processos de caracterização geotécnica do solo escolhido e descrito todos os materiais utilizados e preparados para os ensaios laboratoriais. São descritos ainda o plano de ensaios e o procedimento experimental, desde a homogeneização do solo, preparação dos provetes até à realização dos ensaios laboratoriais de pista.

### 3.2 Solo

O solo utilizado no estudo laboratorial é o resultado de uma mistura prévia de solos, classificados como argila e areia siltosa, disponíveis no laboratório de geotecnia, conforme se pode comprovar no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Tipos de solos usados nos ensaios laboratoriais

Solo utilizado para ensaios	Mistura de solos	
	Argila	Areia Siltosa
	50%	50%

Quando se pretende a construção de uma estrada rodoviária não pavimentada, os ensaios requeridos para a caracterização dos solos são os seguintes: granulometria, plasticidade, compactação, capacidade de suporte, expansibilidade (ANMP, (s.d.)). Neste caso, foram efectuados ensaios para a determinação da composição granulométrica (Figura 3.1), densidade de partículas ( $G$ ), limites de consistência ( $w_p$  e  $w_L$ ) e ainda o ensaio de compactação (Proctor). No Quadro 3.2, apresenta-se um quadro com o resumo das propriedades medidas para cada ensaio.

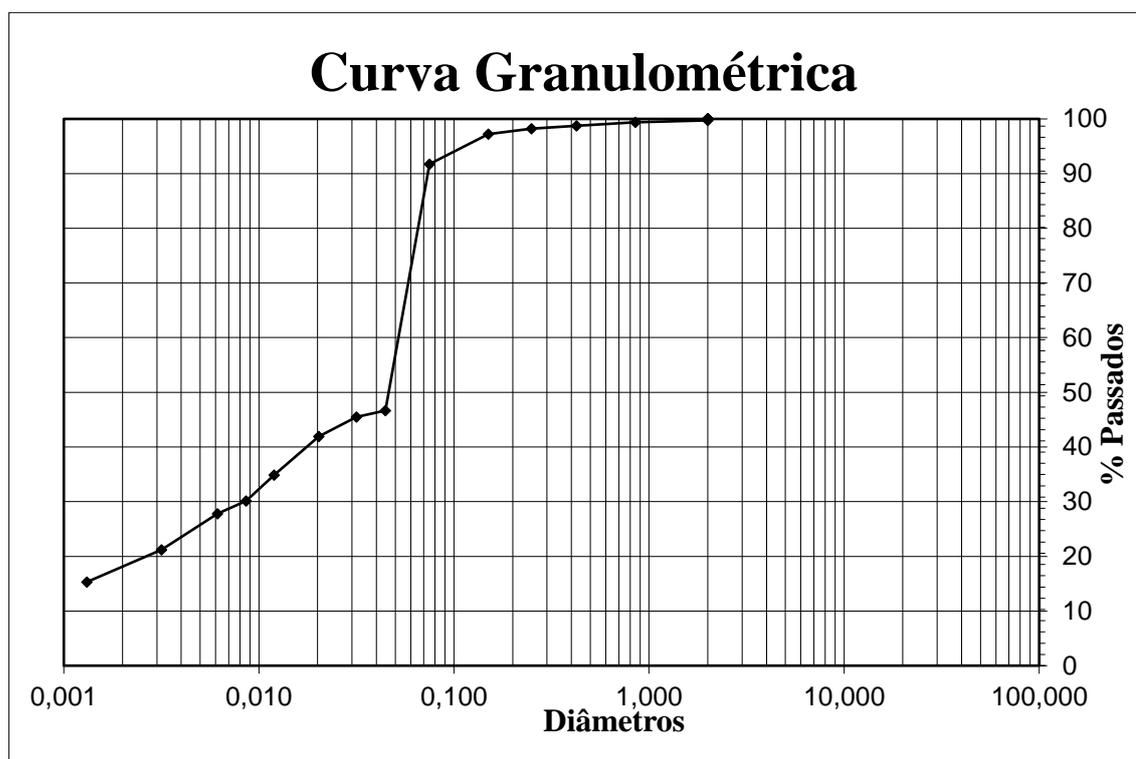


Figura 3.1 – Curva granulométrica do solo

Quadro 3.2 - Principais características geotécnicas do solo utilizado

Solo	Densidade das partículas (G)	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Peso específico seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de humidade óptimo (%)
	2.71	37.7	21.9	17.7	15.2

Para ensaio de análise granulométrica usou-se a Especificação LNEC E196, que consiste na determinação do tamanho das partículas do solo e a sua distribuição para cada intervalo. Este ensaio é dividido em várias fases: preparação da amostra, peneiração grossa, peneiração fina, sedimentação, usando uma adição de antiflocuante para a dispersão do solo (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Preparação da amostra e ensaios de Peneiração e Sedimentação para o cálculo da curva granulométrica

Uma vez que se trata de um solo com uma elevada percentagem de finos (argila), o suficiente para obter um ensaio com valores significativos, procedeu-se à avaliação dos limites de consistência, de acordo com a norma portuguesa NP 143 (1969). Obteve-se um limite de liquidez de 37.7% e o limite de plasticidade de 21.9% resultando num índice de plasticidade de 15.8%, ou seja, um solo muito plástico.

O cálculo da densidade de partículas sólidas (G) foi feito de acordo com a norma portuguesa NP – 83 (1965). O valor da densidade está representado no Quadro 3.2, o ensaio foi realizado com a quantidade partículas passadas no peneiro nº 4, a uma temperatura ambiente de 20°.

Relativamente aos teores de água ótimo, escolheu-se utilizar para compactação o ensaio Proctor leve, molde pequeno, segundo a especificação portuguesa E197 (1966). A curva de compactação apresenta-se na Figura 3.3 e o resultado do teor de água ótimo no Quadro 3.2.

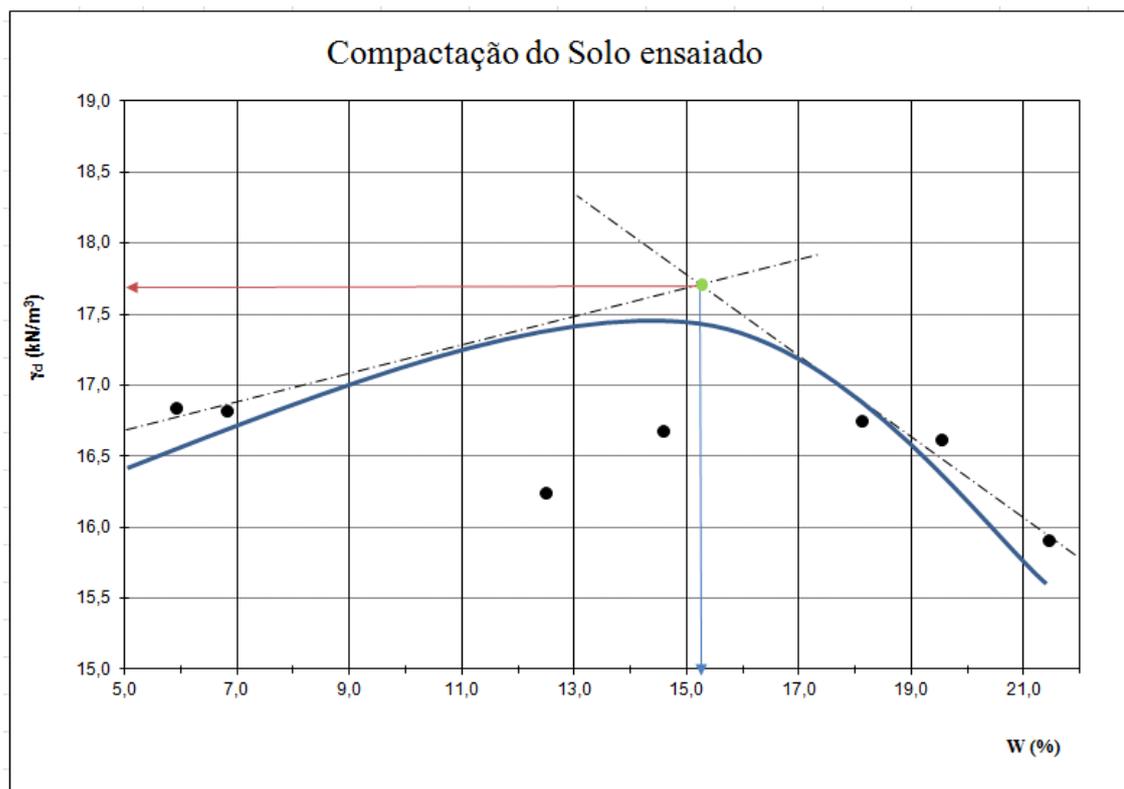


Figura 3.3 – Curva de compactação leve do solo utilizado

Ao analisar o gráfico de compactação facilmente se identifica o resultado obtido, com o semelhante a um solo argiloso. Como o solo apresenta uma boa percentagem de finos, assume um pico mais pronunciado, pois são solos mais densos e com maior peso volúmico. Quanto maior a percentagem de argila no solo, maior será o teor de água óptimo e maior será a redução do peso volúmico seco.

Analisando todos os resultados dos ensaios apresentados anteriormente, podemos proceder à identificação e classificação do solo usado nos ensaios. Este é um passo essencial em quase todos os estudos geotécnicos e obras de terra, havendo vários métodos: classificação unificada de solos (ASTM D 2487-11), a classificação granulométrica (Triângulo Feret) e a classificação AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) usada na área das estradas, fundamentadas na granulometria, nos limites de liquidez e plástico (Limites de Attemberg) e no índice de plasticidade. O Quadro 3.3 resume o resultado da classificação do solo.

Quadro 3.3 – Classificação do solo utilizado

Solo utilizado	Triângulo de Feret	ASTM	AASHTO
	Argila	Argila magra A - 6	Solo argiloso com LL <40% e IP ≥ 11 com comportamento de subleito sofrível e mau

### 3.3 Líquido estabilizante químico: Materiais e Métodos utilizados

Os líquidos estabilizantes químicos a utilizar são o líquido Pure Crete, proveniente de Angola, e o líquido Ecolopavi, proveniente do Brasil. Como referido anteriormente no subcapítulo 2.7.2, os ensaios requeridos para aplicação dos produtos são a análise granulométrica, os limites de Attemberg, a densidade de partículas (G) e o ensaio de compactação Proctor. Todos esses ensaios já foram caracterizados e analisados no subcapítulo 3.2, e por isso, neste subcapítulo vamos analisar o seu método de aplicação e seus materiais.

Tendo em conta que são dois líquidos com compostos orgânicos diferentes, também a sua aplicação tem algumas diferenças. Nos ensaios laboratoriais tentou-se simular em escala todos os procedimentos utilizados na aplicação in situ. Construiu-se uma caixa de ensaios (molde) específica para os ensaios de pista e nela procedeu-se à aplicação dos produtos como se de um troço de estrada se tratasse, simulando diferentes camadas, diferentes percentagens de líquido e diferentes tipos de passagem de veículos (ligeiro e pesado) quando possível.

É de salientar que os líquidos têm diferentes condições ideais de aplicação, diferentes tempos de cura e tratamentos de solo.

No Quadro 3.4 faz-se uma análise da aplicação dos dois tipos de líquido comparando à escala os procedimentos laboratoriais com os procedimentos recomendados para obra.

Quadro 3.4 - Aplicação dos dois líquidos in situ e em Laboratório

Procedimento de aplicação	Pure Crete		Ecolopavi	
	In Situ	Laboratório	In Situ	Laboratório
<p><u>1º Passo:</u> Escarificação do solo</p> 	Até 45 cm de profundidade com escarificador para uma compactação de 30 cm.	As primeiras duas camadas do molde de ensaio de pista.	Até 45 cm de profundidade com escarificador para uma compactação de 30 cm.	As primeiras duas camadas do molde de ensaio de pista.
<p><u>2º Passo:</u> Tratamento do solo com reagente</p>	-	-	Incorporação de cal hidratada para solos de predominância argilosa. 2% em relação ao peso do solo seco de escarificação ou das camadas.	
<p><u>3º Passo:</u> Cura para o reagente actuar</p>	-	-	48 horas	48 horas
<p><u>4º Passo:</u> Homogeneização do solo</p> 	Arando o solo com tractor agrícola	Remexer o solo com ajuda de espátula de lingua de gato e tabuleiro	Arando o solo e reagente com ajuda do tractor agrícola equipado com grade de discos	Remexer o solo com ajuda de espátula de lingua de gato e tabuleiro
<p><u>5º Passo:</u> Dosagem para a 1ª camada</p>	Mistura (Água + Líquido) com o solo para quantidades de teor de água óptimo do solo.  <p><u>Dosagem recomendada pelo fabricante:</u> 0.5 : 1000 (3,5 litros de Pure Crete para 7000 Kg de</p> 		Mistura (Água + Líquido) com o solo para quantidades de teor de água óptimo do solo.  <p><u>Dosagem recomendada pelo fabricante:</u> 1 : 1000 (1 Kg de Ecolopavi para 1000Kg de Solo)</p> 	
<p><u>6º Passo:</u> Aplicação da mistura na 1ª camada</p> 	Cisterna de água para pulverizar o solo com a água e depois a mistura.	Estender a camada de solo num tabuleiro e espalhar a água e depois a mistura pelo solo homogeneamente e mexer tudo muito bem.	Cisterna de água para pulverizar o solo com a água e depois a mistura.	Estender a camada de solo num tabuleiro e espalhar a água e depois a mistura pelo solo homogeneamente e mexer tudo muito bem.

Procedimento de aplicação	Pure Crete		Ecolopavi	
	In Situ	Laboratório	In Situ	Laboratório
7º Passo: Compactação	Nivelar o solo com autoniveladora 	Densificar o solo na densificadora com uma força aplicada de 15 kN durante 2 minutos 	Nivelar o solo com autoniveladora 	Densificar o solo na densificadora com uma força aplicada de 15 kN durante 2 minutos 
8º Passo: Dosagem para a 2ª camada	Mistura (Água + Líquido) com o solo para quantidades de teor de água ótimo do solo. <u>Dosagem recomendada pelo fabricante:</u> 0,5 : 1000 (3,5 litros de Pure Crete para 7000 Kg de Solo) 	Mistura (Água + Líquido) com o solo para quantidades de teor de água ótimo do solo. <u>Dosagem recomendada pelo fabricante:</u> 1 : 1000 (1 Kg de Ecolopavi para 1000Kg de Solo) 		
9º Passo: Aplicação da mistura na 2ª camada	Cisterna de água para pulverizar o solo com a água e depois a mistura. 	Estender a camada de solo num tabuleiro e espalhar a água e depois a mistura pelo solo homogeneamente e mexer tudo muito bem. 	Cisterna de água para pulverizar o solo com a água e depois a mistura. 	Estender a camada de solo num tabuleiro e espalhar a água e depois a mistura pelo solo homogeneamente e mexer tudo muito bem. 
10º Passo: Compactação	Compactar primeiro com o cilindro de Pé-de-carneiro de 15 TON, de seguida passar o cilindro compactador de 20 TON e por último o cilindro onemático de 6 a 10 	Na densificadora aplica-se uma pré-carga de 15 kN durante 10 segundos na primeira metade da camada e depois volta-se a aplicar uma força de 15 kN durante 2 minutos na segunda metade da camada. 	Passar com o cilindro de Pé-de-carneiro de 15 Ton dez vezes em cada faixa de tráfego. Na faixa seguinte passar sobre 50% da faixa anterior. No final passagem de niveladora 	Na densificadora aplica-se uma pré-carga de 15 kN durante 10 segundos na primeira metade da camada e depois volta-se a aplicar uma força de 15 kN durante 2 minutos na segunda metade da camada. 
11º Passo: Tempo de Cura do Molde	4 dias	4 dias	1 dia	1 dia
12º Passo: Após a densificação e tempo de cura	Pronta para receber uma camada fina de asfalto, caso necessário, ou pronta para iniciar a passagem de veículos 	Avança-se com o ensaio de pista 	Pronta para receber uma camada fina de asfalto, caso necessário, ou pronta para iniciar a passagem de veículos 	Avança-se com o ensaio de pista 

### 3.4 Equipamento utilizado nos ensaios

#### 3.4.1 Molde

Para melhor simular o efeito da passagem de veículos no solo reforçado, construiu-se uma caixa metálica com dimensões de 375 mm x 305 mm x98 mm (Figura 3.4). Este molde foi utilizado na fase de densificação e no ensaio de pista.



Figura 3.4 - Molde utilizado para provetes de ensaios de pista

#### 3.4.2 Prensa hidráulica para densificação

A densificação serve para simular a compactação in situ e foi feita através de uma prensa hidráulica Servosis Modelo MUF 404/100 (Figura 3.5). Realizou-se para cada camada de solo um carregamento de 15 kN com cerca de 2 minutos de duração.



Figura 3.5 - Prensa hidráulica utilizada para a densificação

De realçar que caso a densificação não fosse feita com o uso da prensa, teria de se recorrer à compactação manual (Proctor), o que havia a necessidade de aplicar cerca de 4270 pancadas por amostra com o pilão pesado, o que se considerou ser demasiado difícil e demoroso.

### 3.4.3 Ensaio de Pista – Máquina Wheel Tracking

O ensaio de pista simula a passagem de veículos no provete do molde e permite obter os resultados da deformação da amostra (Figura 3.6). Para este ensaio, o equipamento utilizado foi uma máquina de Wheel Tracking, com câmara de acondicionamento do provete (Figura 3.7) e o seu software (Figura 3.8) que permite registar os resultados.

Os limites impostos por cada ensaio foram 10000 ciclos de passagem de roda e 20 mm no limite da deformação.



Figura 3.6 - Máquina Wheel Tracking



Figura 3.7 - Câmara de acondicionamento do provete

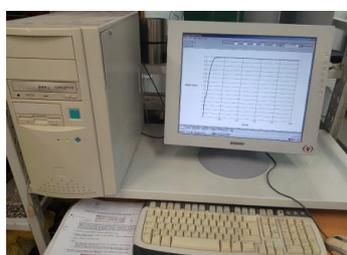


Figura 3.8 - Software utilizado no ensaio de pista

O ensaio pode decorrer aplicando-se uma carga à roda que vai simular os vários tipos de veículos que podem circular (1.770Kg para veículos leves e 3.54 Kg para veículos pesados).

### 3.5 Caracterização e plano de ensaios

#### 3.5.1 Caracterização do provete de ensaio

Numa construção de estradas, para obter uma melhor compactação, a camada de solo deve estar nas condições de humidade correspondentes ao teor óptimo. Como o fundamento da dissertação estudada é saber como se comporta uma estrada não pavimentada sobre solos fracos em situações de tratamento e não tratamento, optou-se por fazer o estudo e ensaiar a provete nas condições de humidade óptimas de forma a obter resultados mais realistas.

Como a área do molde é maior que o molde do Proctor, foi necessário proceder à conversão do peso volúmico seco do Proctor para o peso volúmico seco a ser usado no provete. Com um molde de provete de volume igual a  $11.20 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  o peso volúmico seco resultante do ensaio Proctor igual a  $17.7 \text{ kN/m}^3$ , resultou num molde dividido e densificado em quatro camadas, com cerca de 2.5 cm de espessura, onde cada camada foi sujeita a uma força de compressão de 15 kN (Figura 3.9).

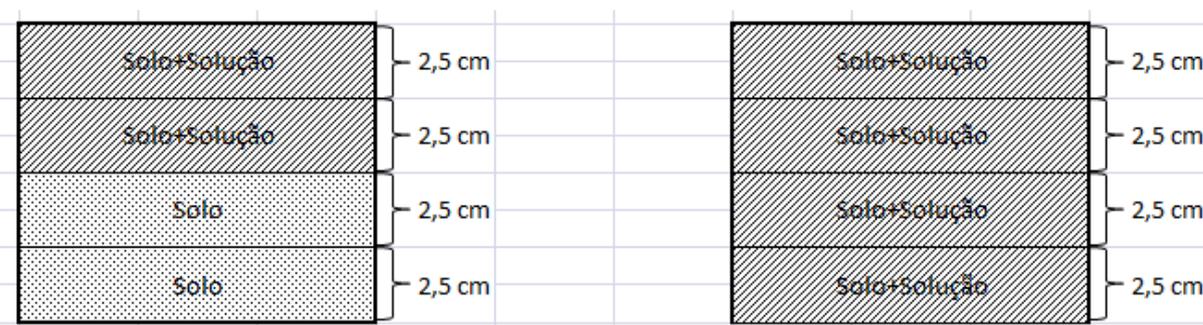


Figura 3.9 - Distribuição do solo em camadas no provete

#### 3.5.2 Planos de Ensaios de Pista

Como indicado no Quadro 3.5, foram realizados onze ensaios de pista, de diferentes características. Inicialmente foi feito um ensaio de pista com o solo sem tratamento para se conhecer o comportamento do solo ao natural. De seguida foram adicionados os dois tipos de líquido estabilizador químico e estudado o seu comportamento em separado.

Para um estudo mais aprofundado da eficácia deste tipo de tratamento, utilizou-se algumas variantes ao longo do plano de ensaios, ou seja, foi-se alterando as percentagens de líquido, a sua distribuição ao longo de camadas (Figura 3.9) e a alternância da carga do ensaio de pista.

Realizaram-se alguns ensaios com carga leve que simulava a passagem de veículos ligeiros e alguns outros ensaios com carga pesada que simulava a passagem de veículos pesadas.

Quadro 3.5 - Plano de Ensaios de Pista realizado na dissertação

Nº de Ensaio	Tipo de Ensaio de Pista	% Líquido	Camada com líquido	Tempo de Cura (Dias)	Força de Compressão (kN)	Carga de Ensaio de Pista
0	Sem tratamento	-	-	-	15	Leve
1	Líquido 1	0,5: 1 000	1/2	4	15	Leve
2	Líquido 1	0,75: 1 000	1/2	4	15	Leve
3	Líquido 1	0,5: 1 000	1/2/3/4	4	15	Leve
4	Líquido 1	0,5: 1 000	1/2/3/4	4	15	Pesado
5	Líquido 2	1: 1 000	1/2	1	15	Leve
6	Líquido 2	1: 1 000	1/2	1	15	Pesado
7	Líquido 2	1,25: 1 000	1/2	1	15	Leve
8	Líquido 2	1,25: 1 000	1/2	1	15	Pesado
9	Líquido 2	0,75: 1 000	1/2	1	15	Leve
10	Líquido 2	0,75: 1 000	1/2	1	15	Pesado

Uma vez que o recomendado para o líquido 1 e 2 é tratar o solo até à profundidade de 45 cm (Quadro 3.4) em campo, e dada a escala 1: 5, para o ensaio de laboratório profundidade corresponde a cerca de três camadas de solo no molde do ensaio de pista. A escala foi determinada tendo em conta a relação de dimensões entre a roda do ensaio (7 cm) e a roda dos veículos (34 cm). Decidiu-se ensaiar o solo tratado nas duas camadas superiores, em alguns ensaios, e noutros ensaios tratar o solo ao longo e toda a altura do provete, ou seja nas quatro camadas.

## **4 TRATAMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo analisa-se os resultados dos ensaios de pista, de acordo com o plano de ensaios descrito no subcapítulo 3.5.2.

A primeira análise é feita ao solo sem tratamento de forma a permitir compreender melhor o comportamento do solo no seu estado natural em condições de teor de água ótimos.

Na segunda parte procede-se à análise do efeito do primeiro líquido estabilizante químico estudado (Pure Crete). Analisa-se o seu comportamento em função das percentagens de concentração de líquido e sua distribuição, conforme descrito no subcapítulo 3.5.2.

A terceira parte da análise foca-se no estudo do comportamento do segundo líquido estabilizante químico (Ecolopavi), introduzindo as alterações de percentagem, à semelhança do líquido anterior.

Por último, faz-se uma análise comparativa dos dois tipos de líquido e do solo sem tratamento, de forma a encontrar a solução mais otimizada.

### **4.2 Comportamento do solo sem tratamento**

Sabendo naturalmente à priori que o solo natural estudado neste trabalho, se trata de um solo fraco com necessidade de tratamento, fez-se um ensaio de pista para melhor compreender o seu comportamento, e também para comparação futura com o solo tratado, possibilitando assim entender o benefício do tratamento.

O solo estudado é um solo muito argiloso e bastante fraco quando sujeito à carga de passagem de veículos e encontra-se no seu estado de humidade correspondente ao teor óptimo.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 comprova-se o seu fraco desempenho, quando, ao aplicar a carga leve do ensaio de pista, o provete atingiu, logo ao fim dos 90 ciclos, a deformação máxima definida de 20 mm. Com este resultado, o ensaio de pista para cargas pesadas deixou de fazer sentido.

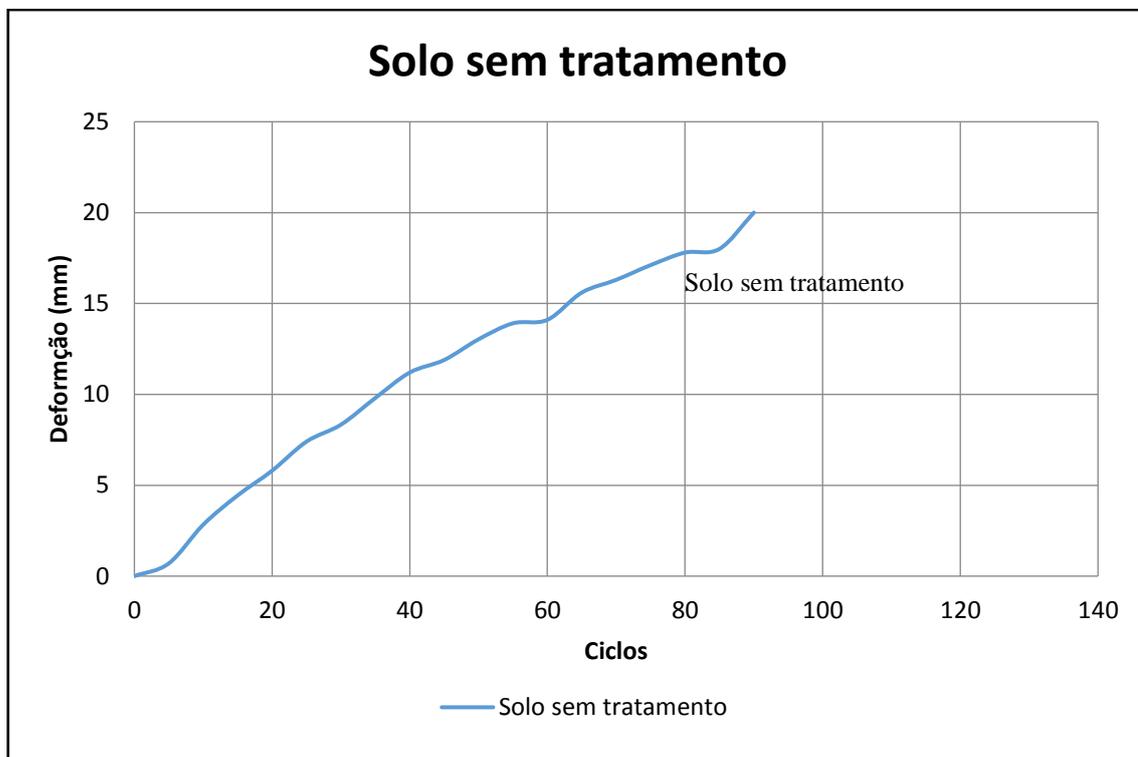


Figura 4.1 – Deformação do solo não tratado



Figura 4.2 - Pormenores do estado do solo não tratado após o ensaio de pista

### 4.3 Comportamento do solo tratado com Líquido 1 (Pure Crete)

Conforme foi referido anteriormente no subcapítulo 4.1, para o estudo do líquido Pure Crete, fez-se um estudo de influência da quantidade de líquido usada (%) e à sua distribuição. Tal como no solo sem tratamento, o solo misturado com o líquido também se encontra no seu teor óptimo de humidade.

A Figura 4.3 e 4.4 analisa o comportamento do solo tratado com diferentes percentagens de líquido (ensaio 1 e 2 conforme Quadro 3.5), apenas nas duas primeiras camadas superiores com carga leve.

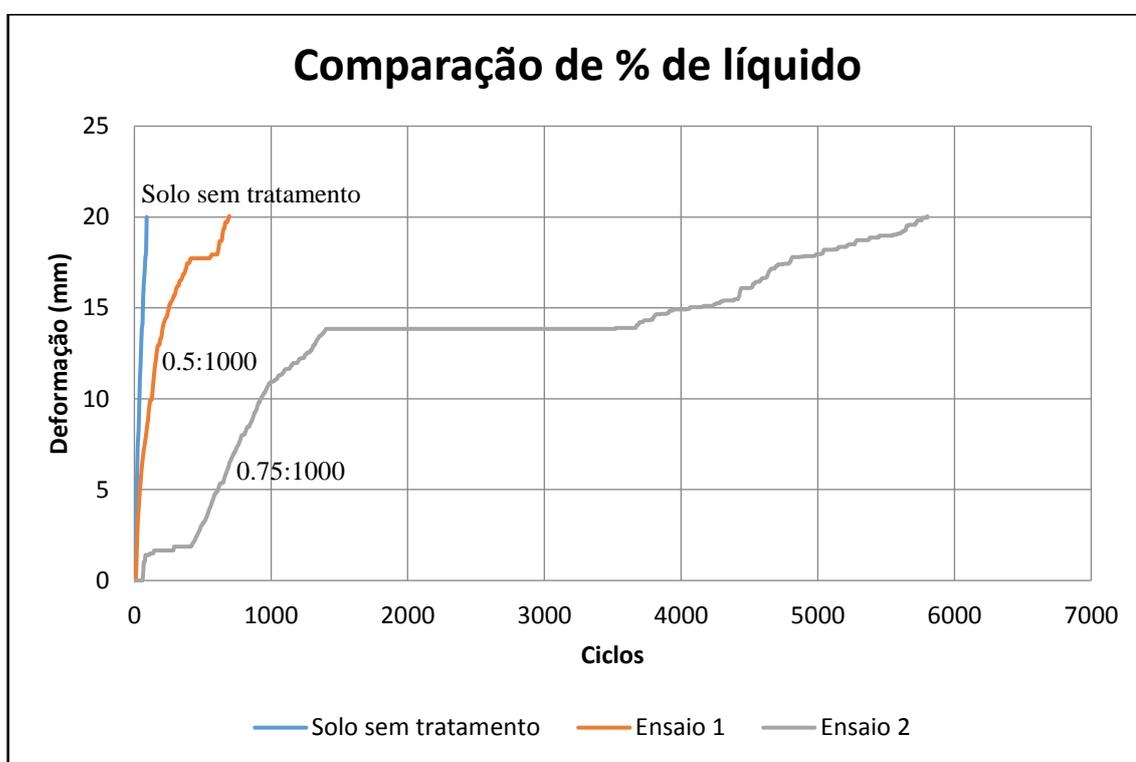


Figura 4.3 - Deformação do solo sem tratamento e tratado com diferentes percentagens do líquido 1

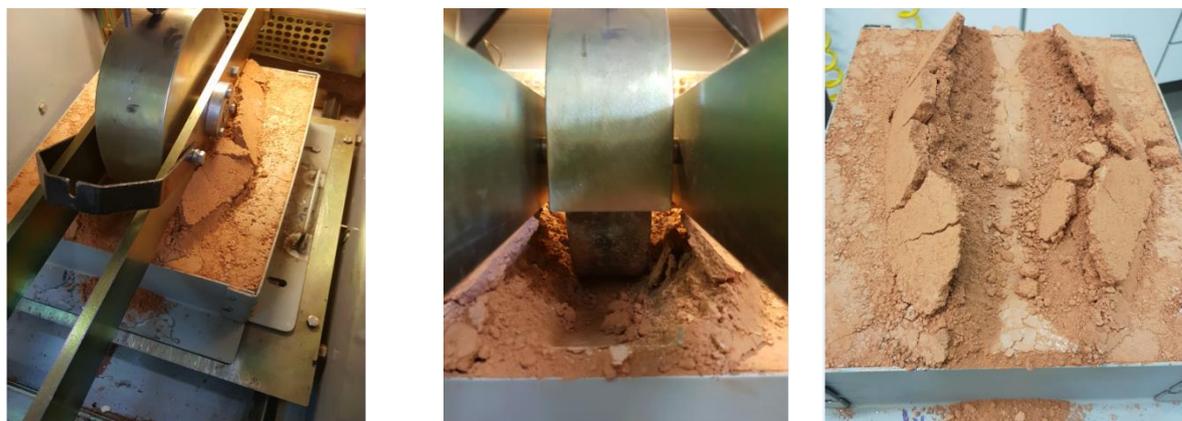


Figura 4.4 - Pormenores do estado do solo tratado, após o ensaio de pista nº 1

De salientar que não fazia sentido avançar para o ensaio de carga pesada, pois como se pode observar na Figura 4.3, mesmo com estas condições, peso leve, o provete atingiu os 20 mm de deformação antes de completar os 10 000 ciclos.

Contudo, nota-se uma melhoria do solo tratado relativamente ao solo sem tratamento. O Quadro 4.1 mostra a influência do tratamento do solo.

Quadro 4.1 - Influência da percentagem de líquido 1

Tipo de Ensaio	Deformação (mm)	% Líquido	Ciclos (nº)	Melhoria
Sem tratamento	20	-	90	0
Ensaio 1	20	0,5: 1 000	695	8x
Ensaio 2	20	0,75: 1 000	5802	65x

Repara-se que houve uma melhoria significativa com o tratamento do solo. O ensaio 1 apresentou uma melhoria de número de ciclos de oito vezes mais relativamente ao solo sem tratamento (ou seja, no estado natural). Já o ensaio 2 apresenta uma melhoria mais significativa de cerca 65 vezes mais de número de ciclos, ou seja, dois terços mais que o solo sem tratamento.

Nota-se uma vantagem grande em aumentar a percentagem do líquido 1 (ensaio 2) de acordo com a percentagem aconselhada (ensaio 1). Com um aumento de 50% de percentagem de líquido (ensaio 2), observa-se uma melhoria de 8 para 65 vezes mais de número de ciclos, ou seja, oito vezes mais de resistência à passagem de veículos ligeiros (1,5: 8). Esta melhoria provavelmente compensará a diferença de custo entre Ensaio 1 e 2.

De seguida, analisa-se o comportamento do solo tratado com uma mesma percentagem de líquido, ou seja, a percentagem de líquido recomendada (0.5: 1 000 L), mas em que o tratamento foi feito, não apenas nas duas camadas superiores, mas nas quatro camadas do provete (na totalidade da altura do provete) (ensaio 1 e 3 conforme Quadro 3.5).

Como se pode observar na Figura 4.5, para uma carga leve, verifica-se uma grande melhoria do comportamento do solo, entrando mesmo em patamar. Este ensaio apresenta uma melhoria de cerca 50% para deformação do solo e suporta 111 vezes mais a passagem de veículos ligeiros que o solo sem tratamento, de acordo com o Quadro 4.2.

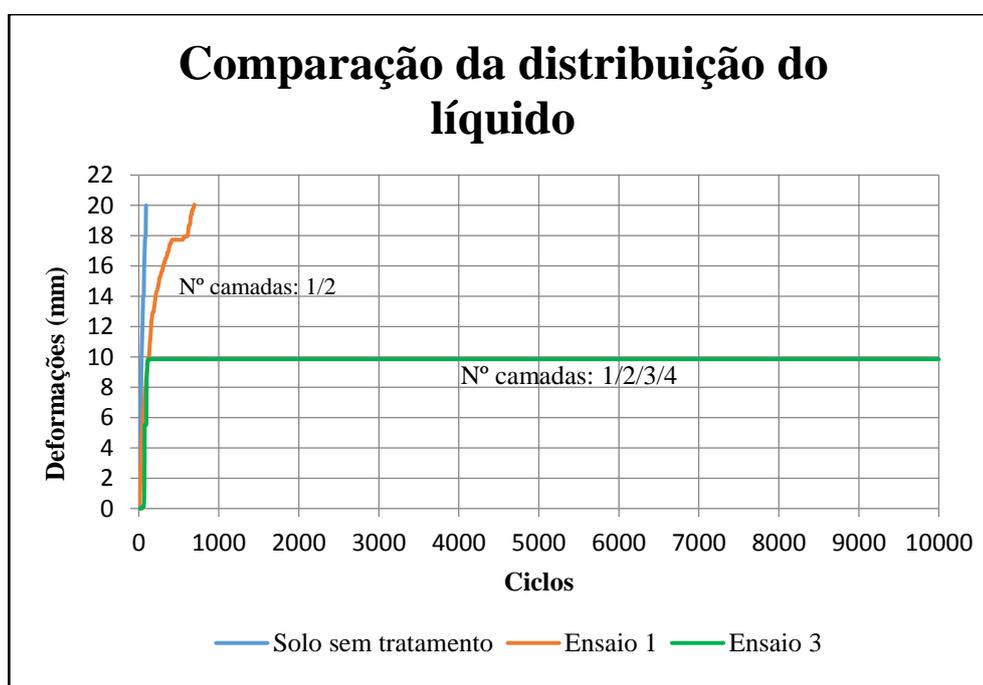


Figura 4.5 - Deformação do solo sem tratamento e tratado com diferente número de camadas tratadas com o líquido 1

Quadro 4.2 - Influência do número de camadas tratadas com o líquido 1

Tipo de Ensaio	Deformação (mm)	Melhoria (%)	Ciclos (nº)	Melhoria
Sem tratamento	20	0	90	0
Ensaio 1	20	0	695	8x
Ensaio 3	9,85	50,75	10 000	111x

Conclui-se que a distribuição do líquido ao longo da altura do provete (ensaio 3) aumenta 14 vezes mais a resistência à passagem de veículos ligeiros em relação à distribuição do líquido

apenas nas duas camadas superiores (ensaio 1). À semelhança do ensaio 2, a diferença de custos aplicável, tendo em consideração as melhorias observadas, indica ser aceitável.

Visto que o provete durante o ensaio 3 entrou em patamar a um número reduzido de ciclos, procedeu-se, durante ainda o mesmo ensaio, no mesmo provete, ao aumento de carga. A fase final do ensaio de pista (ensaio 3) foi por isso realizada com carga pesada (designada esta parte do ensaio por Ensaio 4 conforme Quadro 3.5). O resultado mostra-se na Figura 4.6 e Quadro 4.3.

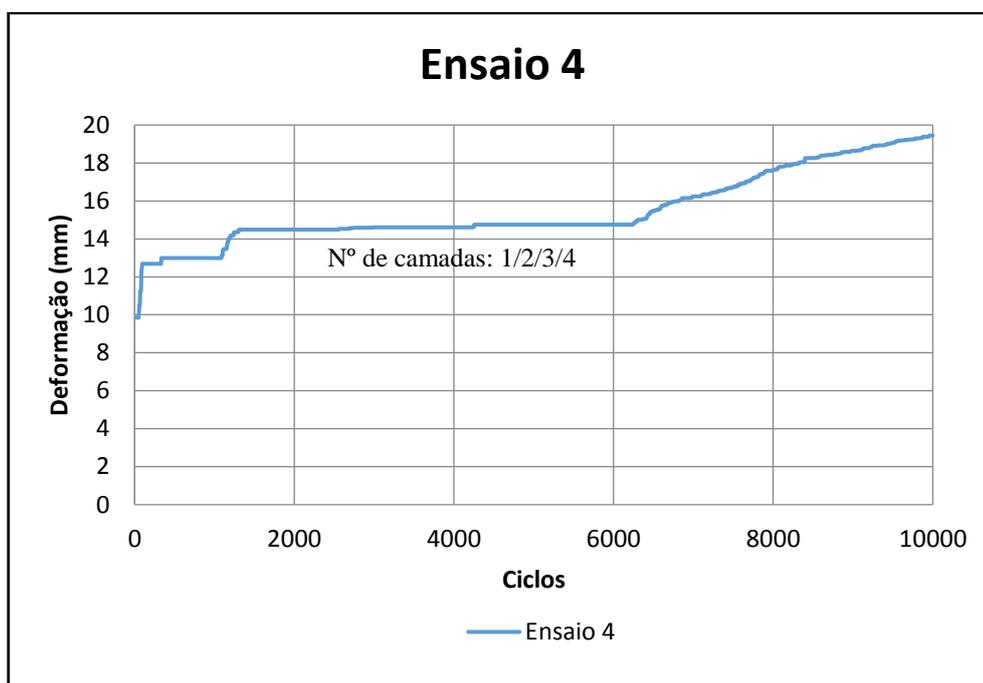


Figura 4.6 - Deformação do solo durante o Ensaio 4

Quadro 4.3 - Influência da distribuição e carga líquido 1

Tipo de Ensaio	Deformação (mm)	Melhoria (%)	Ciclos (nº)	Melhoria
Sem tratamento	20	0	90	0
Ensaio 3	9,85	50,75	10 000	111x
Ensaio 4	19,44	2	10 000	111x

Para o ensaio com carga pesada e com distribuição do líquido ao longo da altura do provete (ensaio 4), a resistência à passagem de veículos pesados manteve-se, notou-se foi uma descida

acentuada das condições de melhoria de deformação atingindo apenas 2% de melhoria mas para um número de ciclos muito maior.

#### **4.4 Comportamento do solo tratado com líquido 2 (Ecolopavi)**

De acordo com o plano de ensaios de pista previsto no subcapítulo 3.5.2 para o líquido Ecolopavi, fez-se uma análise comparativa do comportamento do solo com diferentes concentrações de solução do líquido estabilizante misturado no solo natural, sempre nas condições de teor de humidade óptimas.

Como se obteve excelentes resultados apenas com o ensaio em carga leve (Figura 4.7), decidiu-se manter a distribuição do líquido ao longo de camadas e as mesmas condições de ensaio, procedendo-se logo de seguida ao ensaio com carga pesada.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 consegue-se observar a grande melhoria apresentada pelo líquido Ecolopavi, consoante as diferentes percentagens de líquido para um ensaio de pista com carga leve (Ensaio 5, 7 e 9 conforme Quadro 3.5).

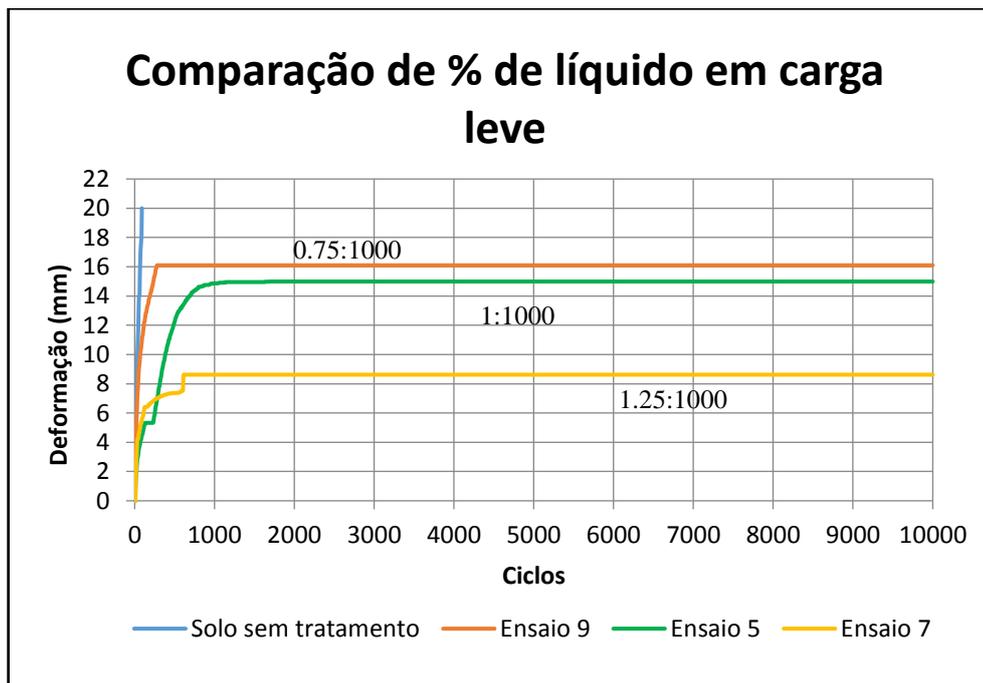


Figura 4.7- Deformação do solo sem tratamento e tratado para diferentes percentagens de líquido 2 com carga leve



Figura 4.8 - Pormenores do estado do solo tratado após o ensaio de pista com líquido 2  
Nota-se no Quadro 4.4 a melhoria percentual deste tipo de soluções já referidas. Para ensaio 9 houve uma melhoria de 19.5% na deformação, enquanto o ensaio 5 apresentou uma melhoria de 25%. Já o ensaio 7 observou-se uma melhoria bastante significativa com um aumento de 57% na melhoria de deformação. No que toca ao número de ciclos, comparativamente ao solo natural, todos melhoraram para 111 vezes mais a sua resistência à passagem de veículos ligeiros. Tendo sido este, o limite de número de ciclos imposto no ensaio de pista, os ensaios sugerem que o solo depois de estabilizar suportaria sem problemas a passagem de veículos ligeiros.

Quadro 4.4 - Influência da percentagem e carga do líquido 2 (carga leve)

Tipo de Ensaio	Deformação (mm)	Melhoria (%)	Ciclos (n°)	Melhoria
Sem tratamento	20	0	90	0
Ensaio 9	16,1	19,5	10 000	111x
Ensaio 5	14,99	25	10 000	111x
Ensaio 7	8,62	57	10 000	111x

Ao alterar a percentagem de líquido nos ensaios 5, 7 e 9, chegou-se à conclusão que o número de ciclos imposto foi atingido e a resistência à passagem de veículos ligeiros se manteve, mudando apenas a melhoria das condições de deformação. O ensaio 7 apresenta um aumento de 25% de concentração de líquido em relação ao ensaio 5, e um aumento de cerca de 100% de melhoria de deformação, já para o ensaio 9, houve uma melhoria de 150% da deformação.

Para os ensaios de pista de carga pesada (ensaio 6,8 e 10 conforme Quadro 3.5) registou-se os seguintes resultados (Figura 4.9).

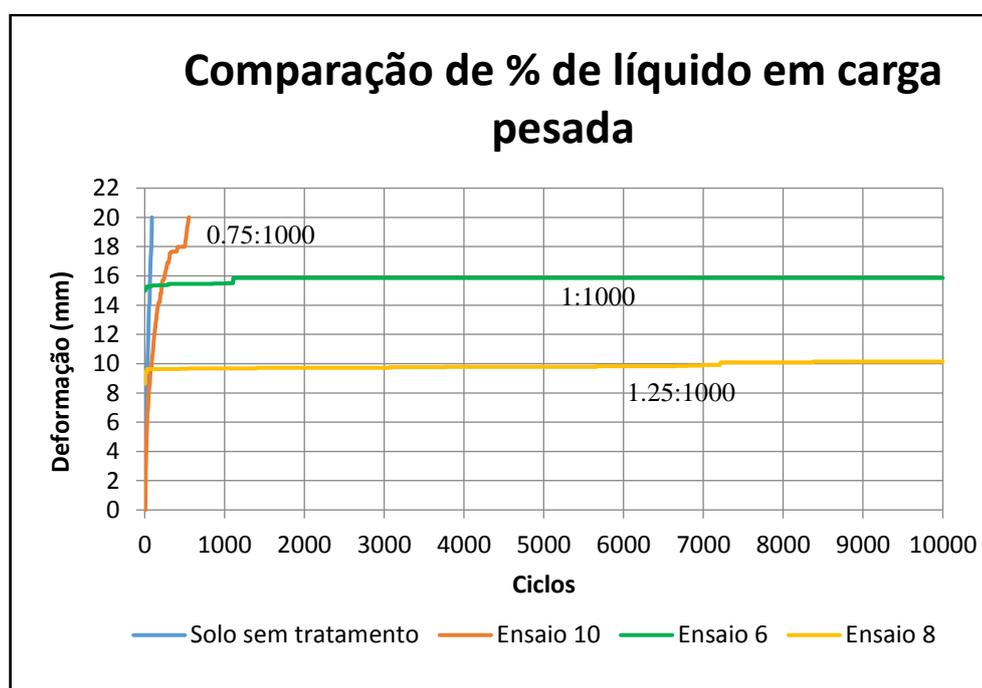


Figura 4.9 – Deformação do solo sem tratamento e tratado para diferentes percentagens de líquido 2 com carga pesada

Comprava-se então a afirmação já antes referida, sobre os excelentes resultados obtidos ao analisar o Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Influência da percentagem do líquido 2 para carga pesada

Tipo de Ensaio	Deformação (mm)	Melhoria (%)	Ciclos (nº)	Melhoria
Sem tratamento	20	0	90	0
Ensaio 10	20,1	0	553	6x
Ensaio 6	15,86	20,7	10 000	111x
Ensaio 8	10,14	49,3	10 000	111x

Relativamente ao solo sem tratamento houve uma melhoria do número de ciclos para o ensaio 10, mas apenas resistiu a 553 ciclos de passagem de veículos pesados, ou seja, melhorou 6 vezes mais a sua resistência à passagem de veículos. O ensaio 6 obteve uma melhoria de 20.7% de deformação e suportou 111 vezes mais a passagem de veículos de pesados do que o solo no seu estado natural. Contudo, o ensaio que obteve melhores resultados foi o ensaio 8, com uma melhoria de cerca de 50% na deformação e 111 vezes mais da resistência à passagem de veículos pesados comparando com o solo natural.

Concluí-se para a carga pesada que o ensaio 10 com menos 25% de percentagem de líquido recomendado, não obteve a mesma resistência à passagem de veículos pesados (6x mais) como os ensaios 6 e 8 (111x mais), tratando-se de uma solução pouco douradura.

Analisando o Quadro 4.5, o ensaio 8 atingiu uma melhoria de deformação duas vezes superior à melhoria de deformação do ensaio 6 com apenas um aumento de 25% de concentração do líquido, o que mais uma vez indica compensar a diferença de custo associado a este tipo de ensaio.

#### 4.5 Comparação de todos os ensaios – Melhor solução

Ao fazer a comparação de todos os ensaios de pista com o solo tratado, temos que confirmar se todos os ensaios verificam as mesmas condições, por isso dividiu-se esta comparação em ensaios de pista de carga leve e ensaios de pista de carga pesada (Conforme Quadro 3.5)

Nos ensaios de pista de carga leve obteve-se bons resultados, contudo houve dois ensaios que se destacaram dos outros, o ensaio 3 e o ensaio 7, conforme se pode observar na Figura 4.10.

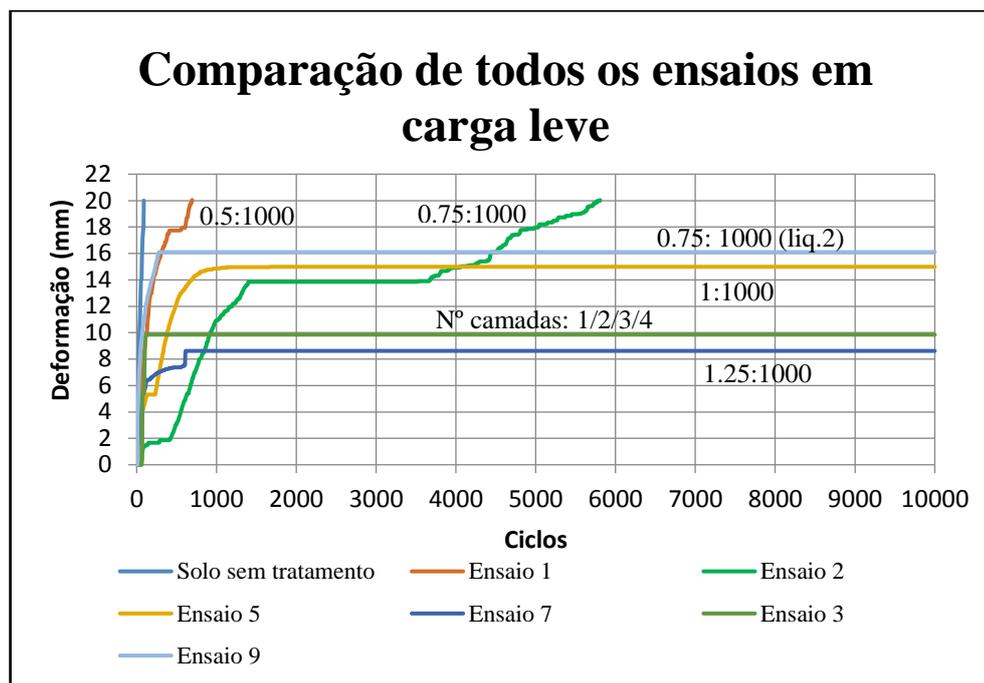


Figura 4.10 – Deformação de todos os ensaios de pista com carga leve

No ensaio 3 atingiu uma deformação de 9.85 mm, ou seja, uma melhoria de cerca 50% em relação ao solo natural, completando o limite de número de ciclos impostos no ensaio de pista, assumindo uma melhoria de 111 vezes mais na resistência à passagem de veículos ligeiros (Quadro 4.6).

Para o ensaio 7 a melhoria de deformação foi superior, atingindo os 57% em relação ao solo natural, ou seja, apenas 8.62 mm de deformação, completando também, à semelhança do ensaio 3, o limite de número de ciclos impostos por o ensaio de pista. Notou-se uma melhoria de 111 vezes mais na resistência à passagem de veículos ligeiros (Quadro 4.6).

Quadro 4.6 – Influência da percentagem e distribuição de líquido com carga leve

Tipo de Ensaio	Deformação (mm)	Melhoria (%)	Ciclos (nº)	Melhoria
Sem tratamento	20	0	90	0
Ensaio 1	20,05	0	693	8x
Ensaio 2	20,04	0	5802	65x
Ensaio 3	9,85	50,75	10 000	111x
Ensaio 5	14,99	25	10 000	111x
Ensaio 7	8,62	57	10 000	111x
Ensaio 9	16,1	19,5	10 000	111x

Ao analisar todos os dados verificámos que o ensaio 3 corresponde ao líquido 1 com distribuição em todas as camadas do provete e o ensaio 7 corresponde a uma percentagem superior à ideal (aconselhada) do líquido 2 distribuído apenas nas duas camadas superiores.

Apesar de corresponderem a líquidos estabilizantes químicos diferentes ambos atingem o limite de número de ciclos imposto no ensaio de pista, havendo apenas uma diferença de melhoria de deformação. De salientar, que a distribuição do líquido por todas as camadas do provete no ensaio 3 leva a maiores custos, em comparação com a distribuição do líquido nas duas camadas superiores do ensaio 7, mesmo sendo essa percentagem de líquido superior à aconselhada.

Tendo em conta todos estes dados, constatámos o ensaio 7 como a melhor solução para o ensaio de pista em carga leve (Quadro 4.7).

Quadro 4.7 – Melhor solução para ensaio de pista com carga leve

Nº de Ensaio	Tipo de Ensaio de Pista	% Líquido	Camada com líquido	Tempo de Cura (Dias)	Força de Compressão (kN)	Carga de Ensaio de Pista
7	Líquido 2	1,25: 1 000	1/2	1	15	Leve

Nos ensaios de pista de carga pesada nota-se uma alteração de resultantes em relação ao ensaio de pista de carga leve. Os ensaios com maior melhoria são os ensaios 6 e 8 (conforme Quadro 3.5), ambos com solo tratado com o líquido 2 (Figura 4.11):

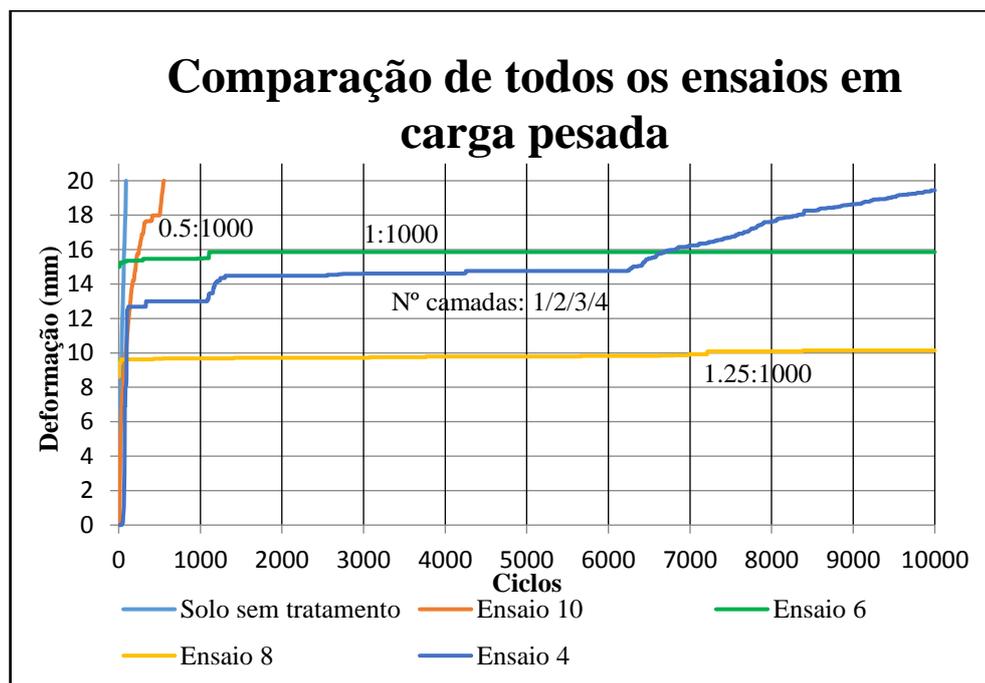


Figura 4.11 – Todos os ensaios de pista de carga pesada

O limite e número de ciclos imposto no ensaio de pista foram cumpridos nos dois ensaios (6 e 8), verificando-se uma melhoria de 111 vezes mais da resistência à passagem de veículos pesados em relação ao solo natural.

Quanto à deformação existem diferenças. O ensaio 6 corresponde às condições ideais (recomendadas) de aplicação do líquido 2 no solo, enquanto o ensaio 8 corresponde a um aumento de percentagem de concentração do líquido 2 no solo. Esta alteração de condições alterou significativamente a melhoria do solo quanto à sua deformação.

O ensaio 8 atingiu uma melhoria de cerca de 50% em relação ao solo natural, enquanto o ensaio 6 atingiu cerca 20 % (Quadro 4.8). Em valores práticos, o ensaio 6 atingiu um máximo de 15.86 mm de deformação e o ensaio 8 com um máximo de 10.14 mm de deformação.

Quadro 4.8 – Influência da percentagem e distribuição de líquido com carga pesada

Tipo de Ensaio	Deformação (mm)	Melhoria (%)	Ciclos (nº)	Melhoria
Sem tratamento	20	0	90	0
Ensaio 10	20,1	0	555	6x
Ensaio 6	15,86	20,7	10 000	111x
Ensaio 8	10,14	49,3	10 000	111x
Ensaio 4	19,44	2	10 000	111x

Esta diferença de melhoria de deformação muito possivelmente compensará o acréscimo de custo que se terá com um aumento de percentagem de concentração do líquido 2 no solo para o ensaio 8.

Verifica-se então que a melhor solução para um ensaio de pista de carga pesada é o ensaio 8 (Quadro 4.9).

Quadro 4.9 – Melhor solução para ensaio de pista com carga pesada

Nº de Ensaio	Tipo de Ensaio de Pista	% Líquido	Camada com líquido	Tempo de Cura (Dias)	Força de Compressão (kN)	Carga de Ensaio de Pista
8	Líquido 2	1,25: 1 000	1/2	1	15	Pesado

Pode-se indicar como melhor solução no global a solução com as seguintes características (Quadro 4.10), a qual corresponde o ensaio 7 e 8.

Quadro 4.10 – Solução otimizada para ensaio de pista

Tipo de Ensaio de Pista	% Líquido	Camada com líquido	Tempo de Cura (Dias)	Força de Compressão (kN)
Líquido 2	1,25: 1 000	1/2	1	15

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Com o desenvolvimento deste trabalho abriu-se uma nova janela para a investigação no DEC no comportamento de estradas não pavimentadas.

Este trabalho pretendeu contribuir para o conhecimento de estradas não pavimentadas tratadas com líquidos estabilizantes químicos. Neste capítulo resume-se as principais conclusões obtidas tendo em conta os resultados experimentais.

A primeira conclusão a retirar dos ensaios de pista é o melhoramento significativo do comportamento do solo após o tratamento com líquido estabilizador químico. Tanto a nível de resistência como de deformação, independentemente do tipo de líquido utilizado no tratamento.

Concluiu-se que para o líquido 1, ao aumentar a percentagem do líquido por camada em 50% (de 0,5:1000 para 0.75:1000) atinge-se uma resistência à passagem de veículos ligeiros oito vezes maior em relação à percentagem de líquido aconselhada (0.5:1000). O manter a percentagem de líquido aconselhada mas distribuir essa percentagem ao longo da altura da provete resulta num aumento de catorze vezes da resistência à passagem de veículos ligeiros, podendo também se aplicar carga de pesado e obter a mesma resistência à passagem de veículos pesados.

Para o líquido 2 tanto em carga leve como em carga pesada, chegou-se à conclusão que a resistência à passagem de veículos se mantém, ou seja, mais do dobro da resistência relativamente ao solo sem tratamento. Nas condições de deformação obteve-se uma melhoria máxima de 57% quando aumentado 25% da percentagem do líquido em relação à percentagem aconselhada (1.25:1000).

Tendo todas estas análises em consideração é possível concluir que o ensaio com melhores resultados em carga leve é o Ensaio 7, correspondente ao líquido 2 e com um aumento de 25% da percentagem líquido nas duas camadas superiores. Atingiu mais do dobro da resistência à

passagem de veículos em relação ao solo sem tratamento e uma melhoria de 57% na deformação. O mesmo se passou na carga pesada, em que o Ensaio 8 com as mesmas características do Ensaio 7 obteve a mesma resistência à passagem de veículos pesados que o Ensaio 7 e uma melhoria de 49.3% na deformação.

Verifica-se que a melhor solução de todos os ensaios de pista analisados é o líquido 2 com uma proporção de 1.25:1000 litros nas duas camadas superiores, com tempo de cura de um dia e sujeito a uma carga de compressão de 15 kN. Esta seria a melhor solução a adoptar na construção de uma estrada não pavimentada com solo tratado.

## 5.2 Trabalhos futuros

Nesta secção pretende-se fazer algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalho futuro, tendo em conta o melhoramento e ampliação dos resultados obtidos neste trabalho.

Alguns possíveis trabalhos a realizar futuramente:

- i. Alterar a distribuição do líquido estabilizante químico ao longo do provete fazendo os mesmos ensaios de pista;
- ii. Fazer os mesmos ensaios de pista com mesmo solo, alterando a força aplicada na prensa hidráulica na fase de densificação;
- iii. Experimentar diferentes tempos de cura após aplicação do líquido estabilizador químico;
- iv. Experimentar variar o número de limite de ciclos imposto no ensaio de pista;
- v. Fazer os mesmos ensaios de pista com diferentes tipos de solo e analisar os dados;
- vi. Fazer uma análise custo-benefício do uso de líquidos estabilizadores químicos numa estrada não pavimentada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 Improvement for Paved and Unpaved Surfaces Using Geogrids. Professional Development Advertising Section – CONTECH Construction Products Inc.

ASTM (2009). “Standar 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.

CARVALHO (1992). CARVALHO, L.D.V. Avaliação da viabilidade da melhoria do projecto geométrico e da conservação das estradas de terra. 1992. 85f. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

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.

CEPA (1999). Instituto do Planejamento e Economia Agrícola de Santa Catarina. Avaliação do projecto de microbacias-componentes estradas. Florianópolis, SC.

CIA@ (2015). <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>, Central Intelligence Agency, EUA. Último acesso a 03-09-2018.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; BERTON, A.; TROMBETTA, A.; FALCÃO, H (1999). Terraceamento em plantio direto. Comunicado técnico, EMBRAPA, n. 08.

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

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 – Especificações LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

ECOLOPAVI-SLIDESHARE@ (2016), <https://pt.slideshare.net/idesaamazonia/apresentacao-ecolopavi-61010490> , Instituto IDESA Amazônia, Brasil. Último acesso a 03-09-2018.

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.

MACHADO, C.C (2003). Volume de enxurrada e perda de solo em estradas florestais em condições de chuva natural. Revista *Árvore*, Viçosa – MG, v. 27, n.4, p. 535-542.

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.

JEONICE WERLE TECHIO (2009). Importância e técnicas para um adequado planejamento do sistema viário no meio rural. PASSO FUNDO, Brasil.

IGS Portugal@(2018). [www.spgeotecnia.pt](http://www.spgeotecnia.pt), Geossintéticos em Estradas Não Pavimentadas. Último acesso a 03-09-2018.

MDEP (2001). “Unpaved Roads – BMP Manual”. Massachusetts Department of Environmental Protection, 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 de água”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

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

NUNES, T.V.L (2003). Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso das redes neutrais artificiais: trecho de Aquiraz – CE. 2003, 118f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

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.

PIMENTA, C.R.T.; OLIVEIRA, MP (2004). Projecto geométrico de rodovias. São Carlos: Rima Editora, 198 p. Referido por Jeonice Techio (2009).

PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; TEIXEIRA, A.F.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, J.M.A.; GRIELBELER, N.P. Hidros: dimensionamento de sistemas hidroagrícolas. Viçosa: Editora IFV, 2006, 259p. Referido por Jeonice Techio (2009).

RODRIGUES, NATACHA (2015). “Reforço de Estradas Não Pavimentadas”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

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.

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 Doutorado, 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

WIX@(2018), <http://pebedesign.wix.com/purecrete#!> ,Pure Crete Company, Angola. Último acesso a 03-09-2018.