



Avaliação da utilização de geossintéticos no dimensionamento de pavimentos rodoviários

Maria Margarida Nazaré Godinho Gonçalves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientadores: Prof. Doutor José Manuel Coelho das Neves
Eng. Helena Maria Rocha Batista de Lima

Júri

Presidente: Prof. Doutor João Torres de Quinhones de Levy
Orientador: Prof. Doutor José Manuel Coelho das Neves
Vogal: Prof. Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

Outubro de 2015

Resumo

Um dos principais problemas associados ao longo do tempo de vida de pavimentos rodoviários é a sua manutenção. De modo a otimizar custos de reabilitação e aumentar o tempo de vida útil dos pavimentos, nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas técnicas de reforço, com a aplicação de geossintéticos. Esta técnica de reforço consiste na aplicação deste material na interface entre as diferentes camadas do pavimento, proporcionando uma distribuição mais equilibrada da carga na sua estrutura, evitando-se uma concentração desta no local onde é aplicada.

O presente documento tem como principal objetivo avaliar a influência da utilização de geossintéticos no dimensionamento de pavimentos rodoviários através de modelação numérica, por elementos finitos, com recurso ao *software* ADINA. Desta forma foi possível analisar a aplicação de uma geogrelha de reforço a várias profundidades do pavimento, em diversas soluções onde os parâmetros base da estrutura do pavimento e fatores externos se alteraram. As várias soluções consideradas tiveram como base parâmetros e valores correntemente utilizados no dimensionamento de pavimentos flexíveis em Portugal.

Depois do estudo efetuado conclui-se que o desempenho do geossintético está diretamente relacionado com as propriedades dos materiais constituintes da estrutura do pavimento. Assim, o geossintético terá maior influência no reforço da estrutura quando aplicado em pavimentos com propriedades mais fracas. Para além disto, conclui-se que a localização do geossintético é um fator importante, obtendo-se melhores resultados quando este se aplica no topo do leito do pavimento. Não obstante disto obteve-se melhorias a nível técnico em todas as soluções em análise.

Palavras-chave: estradas, pavimentos, reforço, geossintéticos, elementos finitos, *ADINA*

Abstract

The major problem associated with the lifetime of a road surface is concerned with its maintenance. In this context and in order to optimize rehabilitation costs and increase the lifetime of pavements, techniques have been developed in recent years, for enhancing the application of reinforcement geosynthetics. This reinforcement technique consists in the application of this material at the interface between different layers of the pavement, providing a more balanced distribution of the load on its structure, to avoid a high concentration at the site where this is applied.

This paper aims to evaluate the influence of the use of geosynthetics in the design of road pavements by numerical modeling, finite element, using the ADINA software. Thus, it was possible to analyze the application of a geogrid at various depths of the pavement in various solutions where the basic parameters of the pavement structure and external factors have changed. The various solutions considered were based on parameters and values currently used in the design of flexible pavements in Portugal.

With this study, it was possible to conclude that the geosynthetic performance is directly related to the properties of the pavement structure constituent materials. Thus, the geosynthetic will have greater influence on the structure reinforcement when applied to pavements with weaker properties. In addition, it is concluded that the location of the geosynthetic is an important factor, with better results when applied on top of the subgrade. Nevertheless, technical improvements were obtained in all considered solutions.

Keywords: roads, pavements, reinforcement, geosynthetics, finite element, ADINA

Agradecimentos

Ao Prof. José Neves, pela disponibilidade demonstrada ao longo do percurso, pela motivação transmitida em todos os momentos e pelo grande interesse no acompanhamento dos resultados. Quero agradecer também a ajuda prestada para a concretização desta dissertação, as sugestões e ensinamentos indispensáveis. O Prof. José Neves é atualmente o Coordenador do GT2 da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes, da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pelo que disponibilizou toda a informação deste grupo de trabalho.

Ao Prof. Luis Castro, pela sua ajuda na transmissão de conhecimentos sobre o programa ADINA e pela sua disponibilidade e paciência sempre que surgiram dúvidas.

À Eng. Helena Lima, pela colaboração prestada ao longo desta fase e pela motivação transmitida mesmo quando a dissertação mudou o seu rumo.

Ao Eng. Pedro Carreira, pela ajuda e tempo dispensado com os seus conhecimentos de programação, que me permitiram concluir o trabalho dentro do prazo proposto.

Aos meus colegas e amigos de curso, em especial à Joana, à Inês e à Sara, pela motivação e força ao longo deste processo, pela ajuda e cumplicidade no término desta fase e também pela partilha de ideias que acabaram por ser fundamentais para a conclusão desta dissertação.

Aos meus amigos, em especial à Catarina, ao Pedro, ao Luka e ao Diogo, pelo apoio e força transmitida em todos os momentos com palavras de conforto e confiança.

Ao Gabriel, um agradecimento especial, pelo apoio não só técnico como também emocional, pelo interesse e preocupação e pelas doces palavras de confiança e força durante esta fase.

À minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, um agradecimento muito especial, por acreditarem sempre em mim e por estarem sempre presentes ao longo deste processo. Quero agradecer a ajuda e preocupação, a nível técnico e emocional, pelo apoio e sábias palavras de coragem, força e confiança. A eles, dedico todo este trabalho.

Índice Geral

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos.....	ix
Símbolos.....	xix
Abreviaturas	xxi
1. Introdução	1
1.1. Âmbito e enquadramento.....	1
1.2. Objetivo e metodologia	1
1.3. Conteúdos da dissertação	2
2. Aplicação de geossintéticos em pavimentos rodoviários	5
2.1. Importância dos geossintéticos	5
2.2. Processo de fabrico de geossintéticos	5
2.2.1. Generalidades	5
2.2.2. Produção de polímeros	6
2.2.3. Produção de componentes	8
2.3. Classificação dos geossintéticos	9
2.4. Funções dos geossintéticos em pavimentos rodoviários	10
2.5. Aplicação de geossintéticos no reforço de pavimentos.....	12
2.5.1. Efeito do reforço	12
2.5.2. Principais tipos de geossintéticos	13
2.6. Dimensionamento e modelação do reforço	24
2.6.1. Princípios de dimensionamento	24
2.6.2. Estudos de modelação	26
2.7. Síntese da experiência em Portugal	27
3. Análise numérica de casos adaptados à experiência portuguesa	29
3.1. Considerações iniciais	29
3.2. Conceção das estruturas do pavimento	29
3.3. Características dos materiais.....	34
3.4. Modelação numérica.....	35
3.4.1. Análise bidimensional.....	35
3.4.2. Geometria e condições de fronteira	37
3.4.3. Propriedades da malha de elementos finitos	38
3.4.4. Características do modelo e suas limitações	39
3.5. Calibração do modelo	39
3.6. Estudo do efeito da localização do geossintético	42
3.7. Estudo do efeito do tipo de geossintético	44

3.8.	Análise da influência da modelação da fundação	44
3.9.	Considerações finais.....	45
4.	Resultados e Discussão.....	47
4.1.	Considerações iniciais	47
4.2.	Critérios de análise	47
4.3.	Efeito do reforço no tráfego admissível	53
4.4.	Efeito do reforço na espessura das camadas	56
4.5.	Efeito do reforço na deformação superficial	59
4.6.	Efeito dos diferentes tipos de geossintéticos.....	63
4.7.	Análise de modelos não lineares	64
4.8.	Considerações finais.....	65
5.	Conclusões e trabalho futuro	67
5.1.	Conclusões gerais	67
5.2.	Trabalho futuro.....	69
	Referências Bibliográficas	71
	ANEXOS.....	75
	Anexo A	77
	Anexo B	79
	Anexo C	81
	Anexo D	91
	Anexo E	93

Índice de Figuras

Figura 2.1: Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura. (Adaptado de Ladeira, 1995)	6
Figura 2.2: Tipos principais de componentes. (Pinto, 2005).....	8
Figura 2.3: Classificação dos geossintéticos: a) Geotêxtil; b) Geogrelha; c) Georrede; d) Geomembrana; e) Geocompósito; f) Geotubo; g) Geocélula; e h) Geospuma. (Adaptado de Bathurst, s.d.b).....	10
Figura 2.4: Funções dos geossintéticos ao longo da profundidade do pavimento. (Adaptado de Zornberg, 2015).....	11
Figura 2.5: Distribuição de tensões na camada de leito do pavimento para um pavimento flexível: a) sem geossintético de reforço; e b) com geossintético de reforço. (Adaptado de Zornberg, 2013)	12
Figura 2.6: Mecanismos provocados pelo geossintético de reforço: a) Resistência lateral; b) Aumento da capacidade de suporte; e c) Efeito de membrana tracionada. (Adaptado de Zornberg, 2013).....	13
Figura 2.7: Estrutura dos geotêxteis: a) Geotêxtil tecido; b) Geotêxtil não tecido. (Adaptado de Pinto, 2005)	14
Figura 2.8: Geotêxtil de fibra orgânica. (Basu et al, 2009)	15
Figura 2.9: Condições da estrada: a) Inicialmente, sem reforço; b) Decorridos 18 meses da aplicação do geotêxtil de reforço; e c) Decorridos 12 meses sem a aplicação de geotêxtil. (Adaptado de Basu et al, 2009).....	16
Figura 2.10: Geogrelha de polipropileno. (TENSAR, s.d.).....	17
Figura 2.11: Geogrelha de fibra de carbono pré-betuminada. (S&P, s.d.)	18
Figura 2.12: a) Geogrelha de polipropileno; e b) Geotêxtil de polipropileno. (Adaptado de Palmeira e Antunes, 2010)	20
Figura 2.13: Geocélula (Geosystems, s.d.).....	22
Figura 2.14: Relação entre a deformação permanente e o número de ciclos de carga. (Adaptado de Thakur et al, 2012)	23
Figura 2.15: Modelo de dimensionamento do reforço: a) de uma estrada sem revestimento de camada ligada; e b) de uma estrada com revestimento de camada ligada. (Adaptado de Jan-Maarten, 2004)	24
Figura 2.16: Valores de TBR típicos para um pavimento com e sem geossintético de reforço que alcança um determinado assentamento vertical. (Adaptado de Mounes et al, 2011 e de Zornberg, 2013)	25
Figura 2.17: Comportamento da extensão de tração sob o centro de aplicação da carga: a) Leito do pavimento fraco sem reforço; e b) Leito do pavimento fraco com aplicação de geogrelha de reforço. (Adaptado de Kim e Lee, 2013)	27
Figura 2.18: Distribuição por tipo de obra de geomateriais em leito do pavimento entre 2001 e 2012. (Lima, s.d.).....	28
Figura 2.19: Distribuição por tipo de geomaterial em leito do pavimento entre 2001 e 2012. (Lima, s.d.).....	28
Figura 3.1: Tipos de pavimento base considerados: a) Pavimento tipo 1; b) Pavimento tipo 2; e c) Pavimento tipo 3.....	30

Figura 3.2: Localizações da geogrelha de reforço para cada uma das soluções em análise.	34
Figura 3.3: Representação da carga modelada para uma análise bidimensional em estado plano de tensão. (Bohagr, 2013).....	36
Figura 3.4: Modelo estrutural axissimétrico considerado no caso em estudo. (Adaptado de Stikan, 2006)	36
Figura 3.5: Geometria do modelo em 2D por elementos finitos em estado de axissimetria.	38
Figura 3.6: Malha de elementos finitos considerada para a solução <i>2 MDA T5 F1 R0</i>	39
Figura 3.7: Propriedades dos materiais do primeiro caso considerado para a calibração do modelo.	40
Figura 3.8: Propriedades dos materiais do segundo caso considerado para a calibração do modelo.	41
Figura 3.9: Propriedades dos materiais do terceiro caso considerado para a calibração do modelo.	42
Figura 4.1: Localização dos pontos onde foram efetuadas as medições das extensões e deformações.....	47
Figura 4.2: Comparação entre os valores das extensões de tração para as várias localizações do geossintético, para classe de plataforma F_1 e classe de tráfego T_7	48
Figura 4.3: Comparação entre os valores das extensões de tração para as várias localizações do geossintético, para classe de plataforma F_2 e classe de tráfego T_7	48
Figura 4.4: Comparação entre os valores das extensões de compressão para as várias localizações do geossintético, para classe de plataforma F_1 e classe de tráfego T_7	49
Figura 4.5: Comparação entre os valores das extensões de compressão para as várias localizações do geossintético, para classe de plataforma F_2 e classe de tráfego T_7	50
Figura 4.6: Percentagem da redução da extensão de tração para posição R_1 e classe de tráfego T_7	50
Figura 4.7: Percentagem da redução da extensão de compressão para posição R_3 e classe de tráfego T_7	51
Figura 4.8: Variação da extensão de tração da solução <i>2 MDA T7 F2</i> ao longo de todo o pavimento: a) sem reforço, R_0 ; e b) com geogrelha de reforço, R_1	52
Figura 4.9: Variação da extensão de compressão da solução <i>2 MDA T7 F1</i> ao longo de todo o pavimento: a) sem reforço, R_0 ; e b) com geogrelha de reforço, R_3	52
Figura 4.10: Variação da extensão de tração da solução <i>2 MDA T7 F2R3</i> ao longo de todo o pavimento.	53
Figura 4.11: Número de passagens do eixo padrão em função do TBR para o critério de fadiga para pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1	54
Figura 4.12: Número de passagens do eixo padrão em função do TBR para o critério de deformação permanente para pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1	54
Figura 4.13: Comparação dos valores do TBR entre as duas classes de plataforma ao critério de fadiga para geogrelha na posição R_1 e classe MD_A	56
Figura 4.14: Comparação dos valores do TBR entre as duas classes de plataforma ao critério de deformação permanente para geogrelha na posição R_3 e classe MD_A	56
Figura 4.15: Número de passagens do eixo padrão sem reforço em função do BLR para o critério de deformação permanente de pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1	57

Figura 4.16: Comparação dos valores do BLR entre as duas classes de plataforma ao critério de deformação permanente para geogrelha na posição R_3 e classe MD_A	58
Figura 4.17: Comparação dos valores do BLR entre as duas classes de plataforma ao critério de deformação permanente para geogrelha na posição R_3 e classe MD_B	58
Figura 4.18: Comparação dos valores do BLR entre as duas classes de plataforma ao critério de deformação permanente para geogrelha na posição R_3 e classe MD_C	58
Figura 4.19: N° de passagens do eixo padrão com reforço em função da deformação horizontal para pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1	59
Figura 4.20: N° de passagens do eixo padrão com reforço em função da deformação vertical para pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1	60
Figura 4.21: Comparação dos valores do SDR entre as duas classes de plataforma para a deformação horizontal com geogrelha na posição R_3 e classe MD_A	61
Figura 4.22: Comparação dos valores do SDR entre as duas classes de plataforma para a deformação vertical com geogrelha na posição R_3 e classe MD_A	61
Figura 4.23: Variação da deformação horizontal da solução $2 MDA T7 F1$ ao longo da estrutura do pavimento: a) sem reforço, R_0 ; e b) com geogrelha de reforço, R_3	62
Figura 4.24: Variação da deformação vertical da solução $2 MDA T7 F1$ ao longo da estrutura do pavimento: a) sem reforço, R_0 ; e b) com geogrelha de reforço, R_3	62
Figura 4.25: Comparação dos valores da % de redução da extensão de tração para o critério de fadiga para pavimento tipo 2, classe de plataforma F_1 , classe MD_A e classe de tráfego T_7	63
Figura 4.26: Comparação dos valores da % de redução da extensão de compressão para o critério de deformação permanente para pavimento tipo 2, classe de plataforma F_1 , classe MD_A e classe de tráfego T_7	64

Índice de Quadros

Quadro 2.1: Família de polímeros mais utilizados no fabrico de geossintéticos. (Pinto, 2005)	7
Quadro 2.2: Propriedades dos polímeros base. (Adaptado de Pinto, 2005)	7
Quadro 2.3: Funções de cada tipo de geossintético.....	11
Quadro 3.1: Valores da classe de plataforma, classe de tráfego e espessura da camada de misturas betuminosas das soluções em estudo.	30
Quadro 3.2: Propriedades dos materiais considerados no pré-dimensionamento das soluções em estudo.....	31
Quadro 3.3: Valores de N_p para cada classe de tráfego.....	32
Quadro 3.4: Características do leito do pavimento para o modelo não linear CamClay.	35
Quadro 3.5: Propriedades dos geossintéticos de reforço considerados na modelação por elementos finitos.	35
Quadro 3.6: Resultados correspondentes ao primeiro caso considerado para a calibração do modelo.	40
Quadro 3.7: Resultados correspondentes ao segundo caso considerado para a calibração do modelo.....	41
Quadro 3.8: Resultados correspondentes ao terceiro caso considerado para a calibração do modelo.	42
Quadro 4.1: Percentagem do aumento do número de passagens do eixo padrão quando se aplica uma geogrelha de reforço.	55
Quadro 4.2: Valores de TBR obtidos para o modelo CamClay.	64
Quadro A.1: Resumo que contempla as várias fontes de informação de cada um dos tipos de geomateriais analisados.....	77
Quadro A.2: Valores de dano de fadiga para as várias soluções em estudo.....	79
Quadro A.3: Valores de dano de deformação permanente para as várias soluções em estudo.	80
Quadro A.4: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 1 e classe de plataforma F_2	81
Quadro A.5: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 2 e classe de plataforma F_1	82
Quadro A.6: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 2 e classe de plataforma F_2	83
Quadro A.7: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 3 e classe de plataforma F_1	84
Quadro A.8: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 3 e classe de plataforma F_2	85
Quadro A.9: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 1 e classe de plataforma F_2	86
Quadro A.10: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 2 e classe de plataforma F_1	87

Quadro A.11: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 2 e classe de plataforma F ₂	88
Quadro A.12: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 3 e classe de plataforma F ₁	89
Quadro A.13: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 3 e classe de plataforma F ₂	90
Quadro A.14: Valores obtidos para o critério de fadiga para diferentes geossintéticos.....	91
Quadro A.15: Valores obtidos para o critério de deformação permanente para diferentes geossintéticos.....	92
Quadro A.16: Valores obtidos para o critério de fadiga para o modelo CamClay.....	93
Quadro A.17: Valores obtidos para o critério de deformação permanente para o modelo CamClay.....	93

Símbolos

α	Fator de agressividade do tráfego
A	Área de aplicação da carga (m ²)
a_1	Espessura da camada de misturas betuminosas para um pavimento do Tipo 1
a_2	Espessura da camada de misturas betuminosas para um pavimento do Tipo 2
a_3	Espessura da camada de misturas betuminosas para um pavimento do Tipo 3
Δ_H	Deformação horizontal
Δ_V	Deformação vertical
D	Dano [%]
d_R	Deformação sentida na superfície do pavimento com geossintético de reforço
d_U	Deformação sentida na superfície do pavimento sem reforço
ε_c	Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação
ε_t	Extensão horizontal de tração na base da camada de mistura betuminosa
E	Módulo de deformabilidade
E_m	Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas
e_G	Espessura considerada para a camada de reforço em representação de uma geogrelha
e_R	Espessura reduzida da camada de misturas betuminosas com geogrelha de reforço
e_U	Espessura da camada de misturas betuminosas dimensionada, sem geogrelha de reforço
F	Carga aplicada [kN]
K_s	Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento

MD_A	Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 3 000 MPa
MD_B	Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 4 000 MPa
MD_C	Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 6 000 MPa
N_p	Número acumulado de eixos padrão de 80 kN pré-dimensionado
N_R	Número de passagens do eixo padrão do pavimento reforçado
N_U	Número de passagens do eixo padrão do pavimento não reforçado
N_{80}	Número acumulado de eixos padrão de 80 kN admissível
p	Período de dimensionamento (20 anos)
PC	Pressão de Contacto (kPa)
R_0	Pavimento sem reforço
R_1	Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base
R_2	Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base
R_3	Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento
t	Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado
$(TMDA)_p$	Tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura ao tráfego, por sentido e na via mais solicitada
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>
V_b	Percentagem volumétrica de betume no volume total

Abreviaturas

<i>ADINA</i>	<i>Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis Software</i>
<i>BCR</i>	<i>Base Course Reduction (Redução da espessura da camada de base)</i>
<i>BISAR</i>	<i>Shell Pavement Design Software</i>
BLR	<i>Bituminous Layer Reduction (Redução da espessura da camada de misturas betuminosas)</i>
CB	Camada de base
CBR	<i>California Bearing Ratio (Índice Californiano de Capacidade de Carga)</i>
CDP	Critério de deformação permanente
CF	Critério de fadiga
CMB	Camada de misturas betuminosas
CPGT	Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes
CSB	Camada de sub-base
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer (Defletómetro de Impacto)</i>
GCL	Geocompósitos argilosos
GT2	Grupo de trabalho em reforço de geomateriais e suas implicações no projeto de pavimentos e vias férreas
IGS	<i>International Geosynthetics Society (Sociedade Internacional de Geossintéticos)</i>
LP	Leito do Pavimento
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PET	Poliéster
PP	Polipropileno

PS	Poliestireno
PVC	Polivinílico de Cloro
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> (Mistura betuminosa recuperada)
<i>SDR</i>	Superficial Displacement Reduction (Redução da deformação superficial)
SPG	Sociedade Portuguesa de Geotecnia
TBR	<i>Traffic Benefit Ratio</i> (Índice de eficiência de reforço no tráfego)
UCC	<i>Unconfined Compression Test</i>
UV	Ultra-violeta
2D	Dois dimensões
3D	Três dimensões

1. Introdução

1.1. *Âmbito e enquadramento*

O tema da dissertação, enquadrada no Mestrado Integrado em Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, surgiu no âmbito do Grupo de Trabalho sobre reforço de geomateriais e as suas implicações no projeto de pavimentos e vias férreas (GT2), da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT), Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG). Neste contexto, houve o interesse no desenvolvimento deste trabalho sobre a aplicação de geossintéticos em pavimentos rodoviários, uma vez que em Portugal não existia ainda nenhum estudo a este nível.

O mercado apresenta atualmente uma grande diversidade de geossintéticos para aplicação em pavimentos rodoviários. No entanto, pretendeu-se com este trabalho apresentar um estudo da sua aplicação direcionada para o reforço dos vários níveis da estrutura do pavimento, que permitisse avaliar quais as suas vantagens em cada nível e quais as que deverão ser selecionadas para estudos mais aprofundados.

Existem já diversos trabalhos, onde se desenvolveram estudos laboratoriais, trabalhos em campo e modelações numéricas com a aplicação de geossintéticos. Contudo, em Portugal, este estudo aplicado a pavimentos rodoviários, encontra-se ainda em desenvolvimento. Por esta razão, este estudo aplicado àquilo que é a experiência portuguesa de dimensionamento e construção de pavimentos, terá bastante interesse. Tal justifica-se, por este material poder ser uma mais-valia, não só, melhorando a capacidade de carga da estrutura de um pavimento rodoviário, como também, podendo trazer reduções em custos de materiais, em termos de redução das espessuras das camadas, ou mesmo na introdução de materiais com características mais fracas.

1.2. *Objetivo e metodologia*

O objetivo da dissertação foi avaliar a influência da utilização de geossintéticos no dimensionamento de pavimentos rodoviários através de modelação numérica, por elementos finitos, com recurso ao *software* ADINA. Desta forma foi possível analisar a aplicação de uma geogrelha de reforço a várias profundidades do pavimento, em diversas soluções onde os parâmetros base da estrutura do pavimento e fatores externos se alteraram. As várias soluções consideradas tiveram como base parâmetros e valores correntemente utilizados no dimensionamento de pavimentos flexíveis em Portugal.

1.3. Conteúdos da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema, objetivos principais pretendidos e também a organização da dissertação.

O segundo capítulo aprofunda o tema dos geossintéticos, com base na pesquisa e aquisição de conhecimentos adquiridos neste âmbito, bem como das técnicas e soluções relacionadas com a sua aplicação em pavimentos rodoviários. Este capítulo inicia-se com uma breve introdução aos geossintéticos nos dias de hoje e, seguidamente, aborda o seu processo de fabrico e a forma de conferir ao material as funções desejadas. É ainda apresentada a sua classificação por tipologia e expostas as funções que este material pode desempenhar quando aplicado, face à classificação anteriormente determinada. Apresentadas as generalidades sobre os vários tipos de geossintéticos e quais as funções que estes poderão desempenhar, desenvolve-se o tema da sua aplicação para reforço de estruturas rodoviárias, uma vez que o trabalho tem como principal objetivo esse tema em concreto. Para o efeito, são tratados diversos temas, tais como a sua função no reforço, a análise de casos de estudo onde se aplicaram geossintéticos com este propósito e os princípios do seu dimensionamento. Conclui-se com uma reflexão sobre a utilização de geomateriais em Portugal.

O terceiro capítulo é dedicado a um caso de estudo, destinado a avaliar o comportamento de estruturas rodoviárias, que têm como base pavimentos dimensionados e construídos em Portugal. Para tal são formuladas várias hipóteses, com base na variação de diversos parâmetros, de modo a construir um modelo de comportamento para o reforço de pavimentos. Para este estudo, foi elaborada uma modelação numérica, com recurso ao *software ADINA*, tendo sido ainda efetuado um levantamento de todos os requisitos assumidos para a programação do modelo em análise. Para validação dos resultados do estudo, foi efetuada uma calibração do modelo, onde se comparam os resultados obtidos no ADINA, com os valores obtidos com o programa BISAR, para os mesmos parâmetros e condições.

Neste capítulo são ainda apresentados os estudos paramétricos realizados para obter e avaliar os resultados finais.

O quarto capítulo apresenta os resultados e uma avaliação acerca destes. Para o efeito, é elaborada uma análise dos critérios considerados, seguida de uma avaliação do comportamento do pavimento face aos vários parâmetros assumidos.

No quinto e último capítulo são apresentadas as principais conclusões da dissertação, bem como algumas propostas de trabalho que poderão dar continuidade ao estudo em apreço.

Nos Anexos, são apresentados os dados recolhidos para a elaboração deste trabalho, designadamente:

- Anexo A: Resumo dos vários artigos científicos analisados no capítulo 2.
- Anexo B: Resultados dos cálculos efetuados para o pré-dimensionamento das estruturas dos pavimentos considerados nas soluções de estudo.

- Anexo C: Resultados das simulações efetuadas com o *software ADINA* e cálculo do TBR, BLR e SDR, para todas as soluções consideradas.
- Anexo D: Resultados das simulações efetuadas com o *software ADINA* e cálculo do TBR e SDR, para diferentes geossintéticos.
- Anexo E: Resultados das simulações efetuadas com o *software ADINA* e cálculo do TBR, para soluções onde se modelou uma fundação não linear.

2. Aplicação de geossintéticos em pavimentos rodoviários

2.1. Importância dos geossintéticos

Para o crescimento de qualquer sistema económico sustentável é necessário ter em consideração que as vias rodoviárias representam um dos sistemas com maior importância no que toca ao desenvolvimento de qualquer país. Na conceção de um pavimento rodoviário é prevista, à partida, a sua durabilidade, parâmetro esse que ao longo dos últimos anos tem vindo a sofrer uma redução considerável devido ao tráfego intenso de veículos pesados verificado, às condições climáticas e às propriedades mecânicas dos materiais utilizados na sua conceção (Palmeira E. M., s.d.).

Os geossintéticos vêm trazer diversas vantagens para os pavimentos rodoviários, tais como reduzir ou evitar a reflexão de fendas, funcionar como barreira evitando a subida de solos finos, reduzir a espessura tanto da camada de misturas betuminosas, como do leito do pavimento e aumentar a capacidade estrutural do pavimento, atuando como reforço das camadas existentes. Desta maneira, podem representar uma alternativa e/ou uma solução quando apresentam contributos técnicos e económicos.

Os geossintéticos marcam, nos dias de hoje, uma presença significativa em diversas obras de Engenharia Civil em todo o mundo, pelas suas vantagens técnicas, económicas e pela sua rápida aplicação no terreno. Esta solução poderá aumentar consideravelmente o desempenho dos pavimentos, dependendo do seu conveniente dimensionamento e instalação. Para além disto, o comportamento do geossintético poderá alterar-se, consoante o tipo, as características, as propriedades mecânicas, o processo de fabrico, o local de aplicação e finalmente, o tipo de materiais e espessuras pelas quais um pavimento é constituído.

2.2. Processo de fabrico de geossintéticos

2.2.1. Generalidades

Um geossintético é um produto constituído por variados tipos de materiais, maioritariamente polímeros sintéticos ou naturais, que são particularmente concebidos para a sua utilização em ambientes de engenharia geotécnica, ambiental, hidráulica e dos transportes (Bathurst, s.d.a).

Existem vários tipos de geossintéticos que diferem consoante as suas características, ao nível dos seus constituintes e da sua estrutura. Na Figura 2.1 é possível observar uma das classificações adotadas para os diversos tipos de geossintéticos.

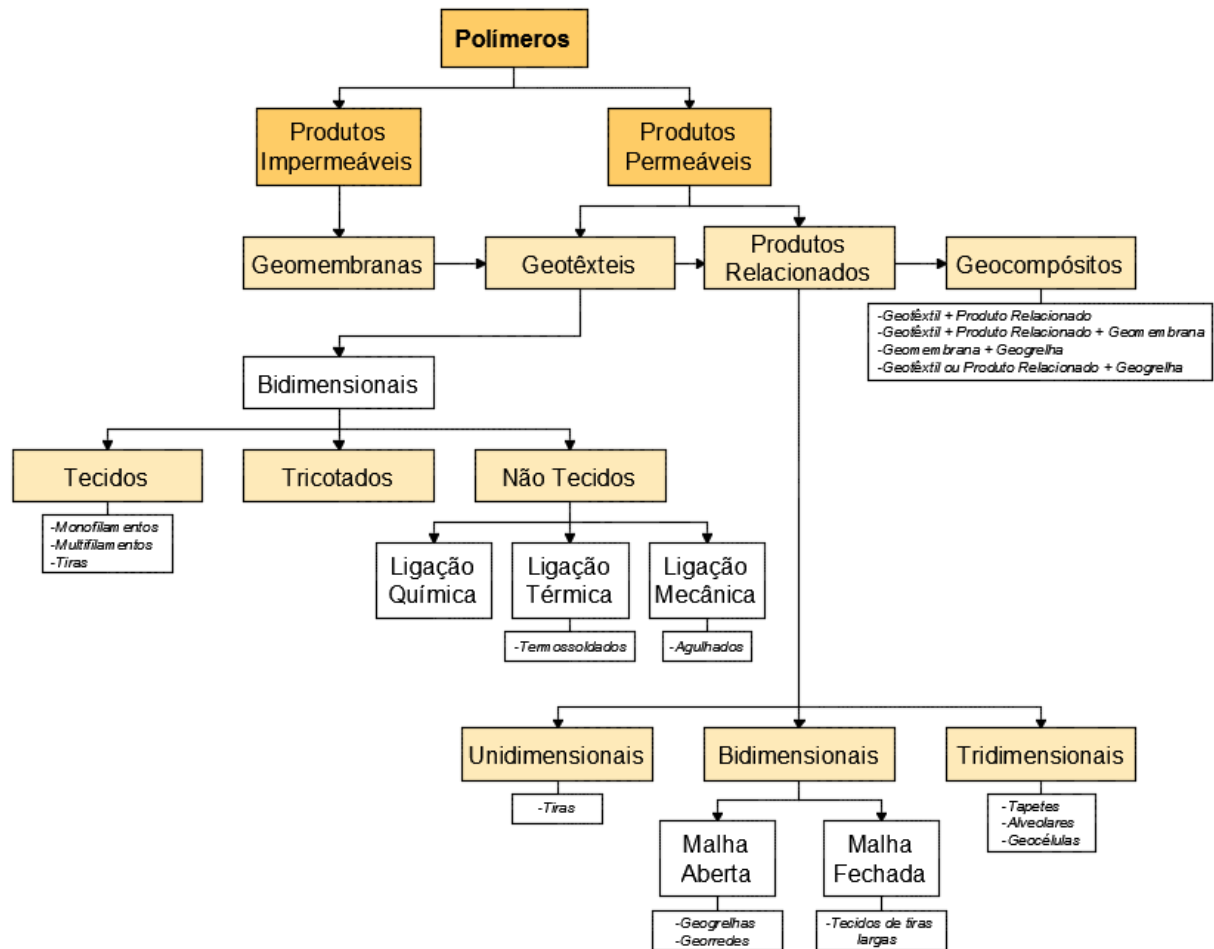


Figura 2.1: Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura. (Adaptado de Ladeira, 1995)

Tal como apresentado na Figura 2.1, os geossintéticos dividem-se em geomembranas, geotêxteis e produtos relacionados. No entanto, existem ainda os geocompósitos que constituem a junção de vários tipos de geossintéticos referidos anteriormente.

O processo de fabrico dos geossintéticos compreende, na sua totalidade, três passos:

1. Produção dos polímeros com a inclusão de aditivos.
2. Produção dos componentes.
3. Transformação dos componentes em geossintéticos.

De seguida apresenta-se uma breve descrição daquilo que compreende cada um dos passos utilizados no processo de produção.

2.2.2. Produção de polímeros

Os principais materiais utilizados no fabrico de geossintéticos são os polímeros, em conjunto com aditivos, se requerido. Os polímeros são fabricados em separado do geossintético, uma vez que

apresentam um carácter essencialmente químico. A estes poderão ser adicionados aditivos para estabilizar as propriedades dos geossintéticos. A sua aplicação poderá dar-se na fase de fabrico dos polímeros, ou na fase em que o geossintético propriamente dito é fabricado. Geralmente os aditivos são adicionados em fase posterior, conforme o objetivo que se pretenda dar ao geossintético.

Existem variados polímeros selecionados para o fabrico dos geossintéticos, consoante o objetivo a servir. No Quadro 2.1 podem visualizar-se os tipos de geossintéticos produzidos, consoante o tipo de polímero utilizado. A escolha do tipo de polímero deverá ser efetuada tomando em consideração o tipo de solicitação a que estes estarão sujeitos, bem como o contacto com outros materiais ou agentes atmosféricos. Associada a esta decisão, existem sempre aspetos positivos e negativos, que dizem respeito às propriedades físicas e mecânicas do geossintético a produzir. No Quadro 2.2 são apresentadas as propriedades dos polímeros mais utilizados na indústria de geossintéticos.

Quadro 2.1: Família de polímeros mais utilizados no fabrico de geossintéticos. (Pinto, 2005)

Polímero	Tipo de geossintético
Polietileno (PE)	Geotêxteis, Geomembranas, Geogrelhas, Geotubos, Georedes, Geocompósitos
Polipropileno (PP)	Geotêxteis, Geomembranas, Geogrelhas, Geocompósitos
Polivinílico de Cloro (PVC)	Geomembranas, Geotubos, Geocompósitos
Poliéster (PET)	Geotêxteis, Geogrelhas
Poliamida (PA)	Geotêxteis, Geogrelhas, Geocompósitos
Poliestireno (PS)	Geocompósitos

Quadro 2.2: Propriedades dos polímeros base. (Adaptado de Pinto, 2005)

Propriedades		Polímeros				
		PET	PA	PE	PP	
Resistência		3	2	1	1	
Módulo de Elasticidade		3	2	1	1	
Deformação à rotura		2	2	3	3	
Fluência		1	2	3	3	
Densidade Relativa		3	2	1	1	
Custo		3	2	1	1	
Resistência a	Radiações UV	Estabilizado	3	2	3	3
		Não Estabilizado	3	2	2	1
	Bases	1	3	3	3	
	Micro-organismos	2	2	2	3	
	Óleos	2	2	1	1	
	Detergentes	3	3	3	3	

Legenda: 3 - Elevado; 2 - Médio; 1 - Baixo

Analisando os valores apresentados neste quadro, é possível concluir que os poliésteres apresentam maior resistência e melhor comportamento à deformação ao longo do tempo (menor fluência). No entanto esta é a solução que apresenta o custo mais elevado.

2.2.3. Produção de componentes

Após determinar o polímero que melhor se adapta às condições exigidas, este é convertido em componente para posteriormente se produzir o geossintético. Para a produção de componentes podem ser utilizados dois métodos, ambos por extrusão ou fiação líquida:

- A produção de um filme contínuo, ou folha, que pode ser posteriormente dividido em tiras por corte; a mistura em fusão é forçada a atravessar uma fenda, variável em espessura (Lopes, 2001).
- A produção de filamentos contínuos, obtidos a partir da passagem da mistura numa placa perfurada; a mistura em fusão é forçada a atravessar uma placa perfurada (Lopes, 2001).

Depois deste procedimento, dá-se a solidificação, geralmente por tratamentos de aquecimento, e o estiramento do componente. Estes processos têm como objetivo a melhoria das características do material, tais como o aumento da resistência à tração e do módulo de elasticidade e diminuição da elongação na rotura e na fluência.

Os componentes produzidos a partir dos métodos descritos anteriormente podem ser utilizados em separado ou conjuntamente. Na Figura 2.2 podem ser observados os principais tipos de componentes de geossintéticos que são produzidos. Tem-se como exemplo o monofilamento, com apenas um componente, ou outras soluções que englobam mais componentes, como é o caso do multifilamento.

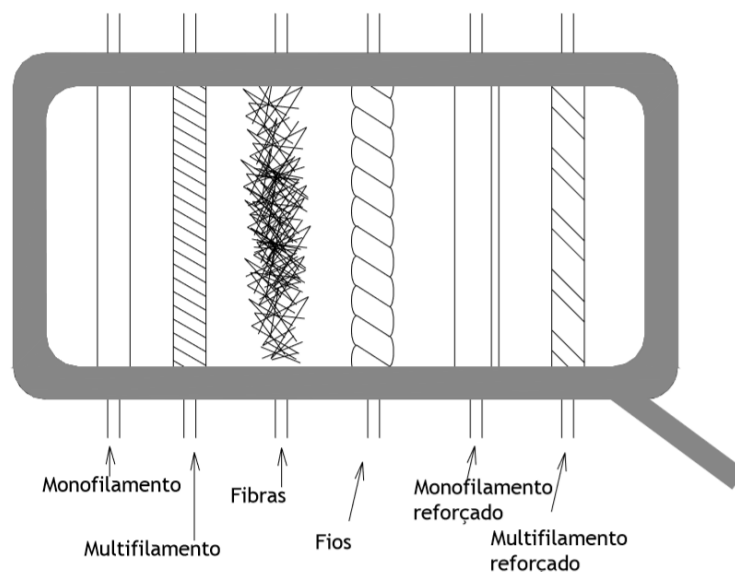


Figura 2.2: Tipos principais de componentes. (Pinto, 2005)

2.3. Classificação dos geossintéticos

Após a fase de produção de componentes, estes são finalmente transformados em geossintéticos. O tipo de geossintético formado é definido pela sua estrutura, tal como já apresentado na Figura 2.1. De seguida apresentam-se os tipos de geossintéticos que se poderão formar, classificados em diversas categorias e, mais adiante, será efetuada uma análise mais detalhada daqueles que têm a função de reforço. A classificação dos geossintéticos foi considerada com base no folheto técnico de Bathurst (s.d.b). Na Figura 2.3 é possível observar a ilustração correspondente a cada tipo de geossintético.

- **Geotêxteis:** estes materiais poderão ser tecidos, não tecidos, tricotados ou costurados e, telas contínuas de fibras ou filamentos. Os últimos são flexíveis e permeáveis, apresentando o aspeto de um têxtil.
- **Geogrelhas:** este geossintético, tal como o nome indica, apresenta o aspeto de uma grelha.
- **Georredes:** este geossintético é obtido “por extrusão de duas séries de elementos paralelos poliméricos que se cruzam segundo um determinado ângulo”.
- **Geomembranas:** este geossintético, tal como é possível visualizar na Figura 2.3, apresenta o aspeto de uma tela homogénea flexível e que é constituída por materiais sintéticos.
- **Geocompósitos:** estes são caracterizados por constituírem uma combinação de dois ou mais tipos de geossintéticos. Temos como exemplo, geotêxtil-georrede, geotêxtil-geogrelha, georrede-geomembrana.
- **Geocompósitos argilosos (GCL):** este material consiste num geocompósito ao qual se adiciona uma camada de argila bentonítica no seu fabrico. Esta camada é tipicamente, colocada entre uma camada superior e inferior de geotêxtil, de mistura de geotêxtil e bentonite colada a uma geomembrana ou tela simples de geotêxtil. “Os geotêxteis que compõem os GCL são frequentemente cozidos ou agulhados através do núcleo de bentonite para aumentar a resistência interna ao corte do geocompósito”.
- **Geotubos:** este material, tal como o nome indica, é um tubo polimérico que poderá ser perfurado ou não. Dependendo da necessidade, este geossintético poderá ser envolvido por um filtro de geotêxtil.
- **Geocélulas:** este material é constituído por tiras poliméricas, que formam redes tridimensionais espessas. Estas tiras são ligadas entre si e poderão ser preenchidas com solo, ou em alguns casos betão.
- **Geoespumas:** é constituído por “blocos ou placas de poliestireno expandido que formam uma estrutura de baixa densidade. A geoespuma é utilizada como isolamento térmico, enchimento leve para aterros ou como placa vertical compressível para reduzir a pressão de terras em muros de suporte rígidos”.

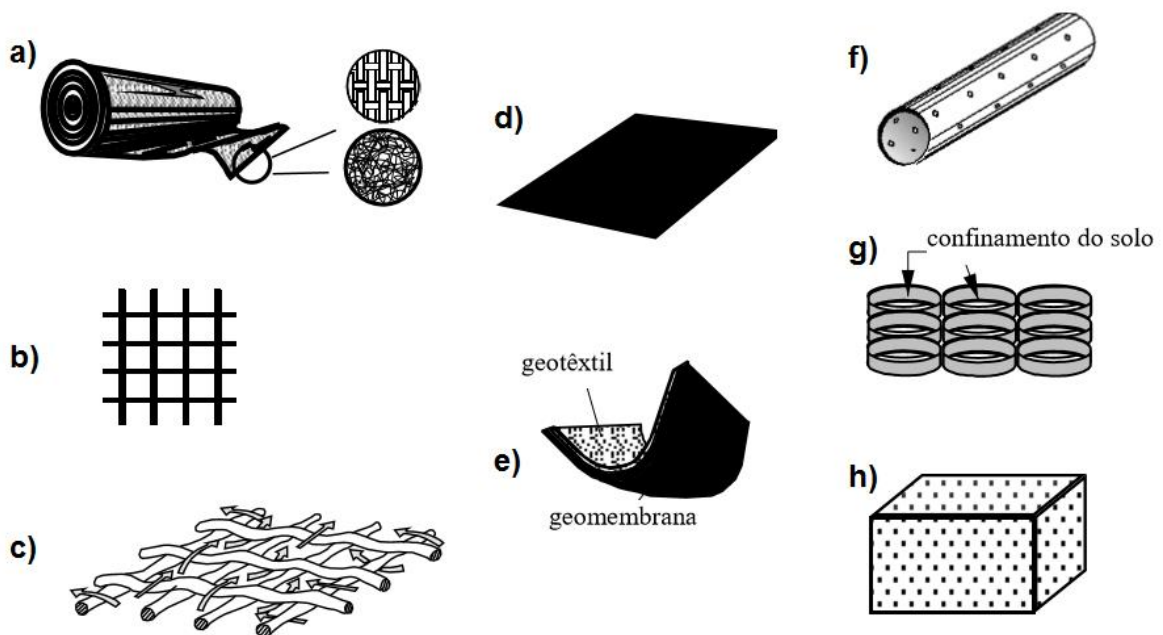


Figura 2.3: Classificação dos geossintéticos: a) Geotêxtil; b) Geogrelha; c) Georrede; d) Geomembrana; e) Geocompósito; f) Geotubo; g) Geocélula; e h) Geoespuma. (Adaptado de Bathurst, s.d.b)

2.4. Funções dos geossintéticos em pavimentos rodoviários

Como referido anteriormente, os geossintéticos podem evitar ou reduzir variados problemas consoante as suas características mecânicas e estruturais. Podem desempenhar diversas funções, consoante o problema em causa está associado ao tipo ou forma do terreno. É ainda possível melhorar as características do geossintético-solo consoante a camada em que este é aplicado. Apresentam-se de seguida as várias funções dos geossintéticos, consoante a sua localização na estrutura do pavimento. Sublinha-se que, consoante a função do geossintético, os seus constituintes variam de modo a satisfazer os requisitos necessários.

- **Reforço:** nos casos mais comuns, o geossintético desempenha esta função, quando ocorre uma interação com o solo em que se insere, de modo a obter melhores propriedades resistentes e de deformabilidade. Neste caso, é mais comum a utilização de geotêxteis e geogrelhas, pois estes garantem o aumento da resistência à tração do solo. Na Figura 2.4 pode observar-se que para esta função, o geossintético poderá ser colocado em diversas localizações do pavimento;
- **Separação:** o geossintético pode funcionar como uma barreira de separação entre camadas de granulometrias distintas, evitando que os solos finos provenientes da fundação contaminem as camadas adjacentes constituídas por materiais granulares;
- **Filtragem:** pode também ser colocado de modo a funcionar como um filtro, permitindo por um lado que ocorra o escoamento de água e por outro que haja a reserva de solos finos. Deste modo, poder-se-á evitar o arrastamento de finos para a camada granular drenante ou para os drenos longitudinais;

- **Drenagem:** o geossintético pode ainda funcionar como barreira drenante, possibilitando o escoamento da água através do solo, cuja permeabilidade é menor. Geralmente esta função não é muito viável em pavimentos rodoviários, uma vez que em condições normais os pavimentos não podem possuir água na sua estrutura.

Considerando as várias funções, a escolha do geossintético a utilizar e em que camada de pavimento se deve aplicar, tem como base o objetivo a cumprir nesse mesmo pavimento. No Quadro 2.3 é possível observar as funções para cada tipo de geossintético (apenas se apresentam as soluções utilizadas em pavimentos rodoviários). Na Figura 2.4 é possível visualizar a camada onde, a função a desempenhar, determina a aplicação do geossintético.

Quadro 2.3: Funções de cada tipo de geossintético.

	Reforço	Separação	Filtragem	Drenagem
Geotêxteis	√	√	√	√
Geogrelhas	√			
Geocompósitos			√	√
Geocélulas	√			

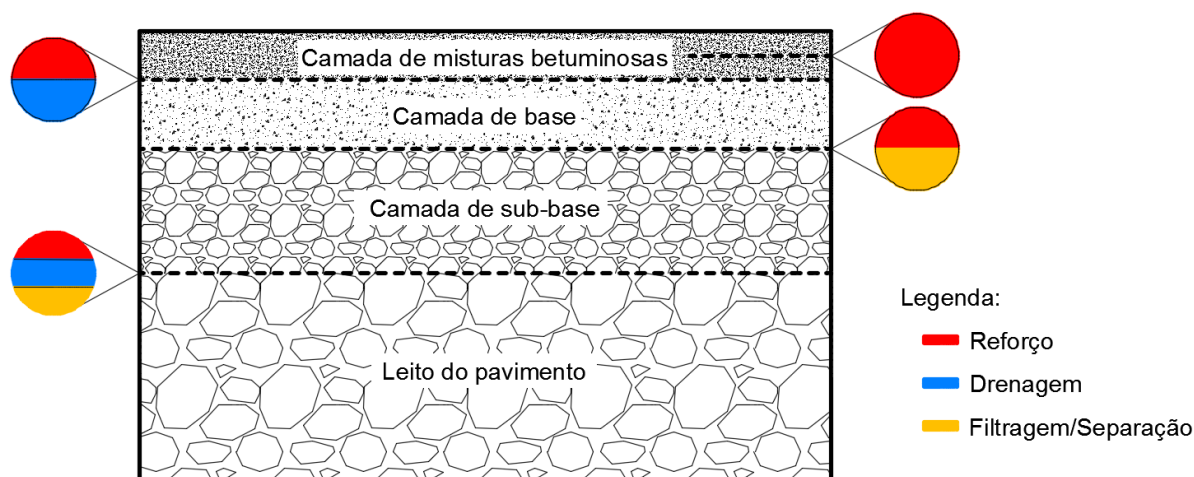


Figura 2.4: Funções dos geossintéticos ao longo da profundidade do pavimento. (Adaptado de Zornberg, 2015)

O tema da dissertação, na sua generalidade, diz respeito a soluções utilizadas para o reforço de pavimentos, pelo que, daqui em diante, apenas se terá em consideração esta função. No entanto, estudar-se-á a solução em função da profundidade da sua localização.

2.5. Aplicação de geossintéticos no reforço de pavimentos

2.5.1. Efeito do reforço

Tal como anteriormente referido, para o reforço do pavimento, o geossintético pode localizar-se a vários níveis. Assim, pretende-se estudar o comportamento do geossintético, de modo a conferir melhor capacidade de suporte ao material das camadas onde este é aplicado. Com este procedimento, o pavimento pode sofrer uma tensão mais equilibrada, tal como ilustra a Figura 2.5b), ou seja, ocorre uma distribuição da carga, não se concentrando no seu ponto de aplicação, Figura 2.5a).

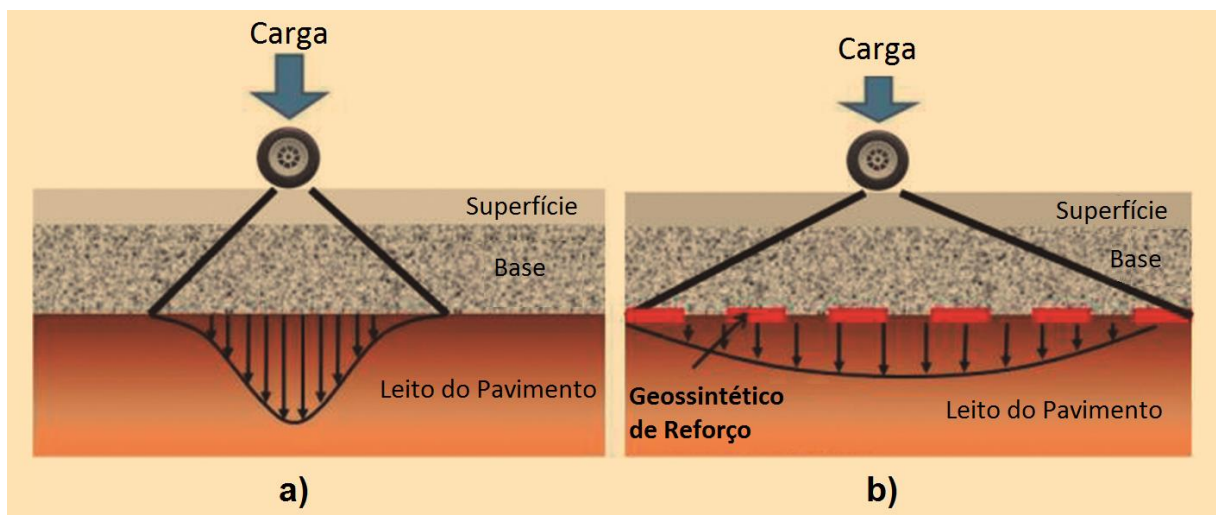


Figura 2.5: Distribuição de tensões na camada de leito do pavimento para um pavimento flexível: a) sem geossintético de reforço; e b) com geossintético de reforço. (Adaptado de Zornberg, 2013)

Com a utilização de um geossintético de reforço pode obter-se, tendencialmente, uma melhoria considerável no que diz respeito às tensões que são transmitidas para as camadas mais profundas. Tal facto deve-se a três mecanismos resultantes da interação do geossintético com o material subjacente: a resistência lateral, Figura 2.6a), o aumento da capacidade de suporte, Figura 2.6b) e o efeito de membrana tracionada, Figura 2.6c). De seguida é elaborada uma especificação do funcionamento de cada um deles.

- **Resistência lateral (Figura 2.6a):** este mecanismo, tal como o nome indica, está associado à resistência lateral que é provocada pela fricção entre o geossintético e o material subjacente. Para além disto, este material funciona também como uma força de corte resistente entre as interfaces. Quando qualquer pavimento é submetido a forças cíclicas (tráfego), o agregado presente nas camadas granulares, tem tendência para se mover lateralmente. Ora, com a aplicação de um geossintético, esta tensão será diretamente transmitida para este. Deste modo, o geossintético funcionará como barreira aos movimentos laterais possibilitando que o pavimento obtenha resistência a estas forças. É de notar que toda a constituição do geossintético será importante nesta fase, uma vez que a abertura da rede e os materiais constituintes irão contribuir na íntegra para a resistência lateral do geossintético (Zornberg, 2013).

- **Aumento da capacidade de suporte (Figura 2.6b):** para além do mecanismo explicitado anteriormente, o geossintético também proporciona um aumento da capacidade de suporte do solo onde este é aplicado, uma vez que atua como superfície de rotura alternativa. Ora, esta nova superfície, irá garantir uma capacidade de suporte superior a partir da diminuição da tensão de corte que é aplicada sobre o pavimento (Zornberg, 2013).
- **Efeito membrana tracionada (Figura 2.6c):** por último, o geossintético irá suportar a carga proveniente do eixo funcionando como uma membrana tracionada, ou seja, o reforço irá produzir uma reação vertical de modo a minimizar a ação da carga produzida pelos veículos. Tal efeito reduzirá a tensão transmitida ao leito do pavimento, conferindo-lhe maior capacidade de suporte (Zornberg, 2013).

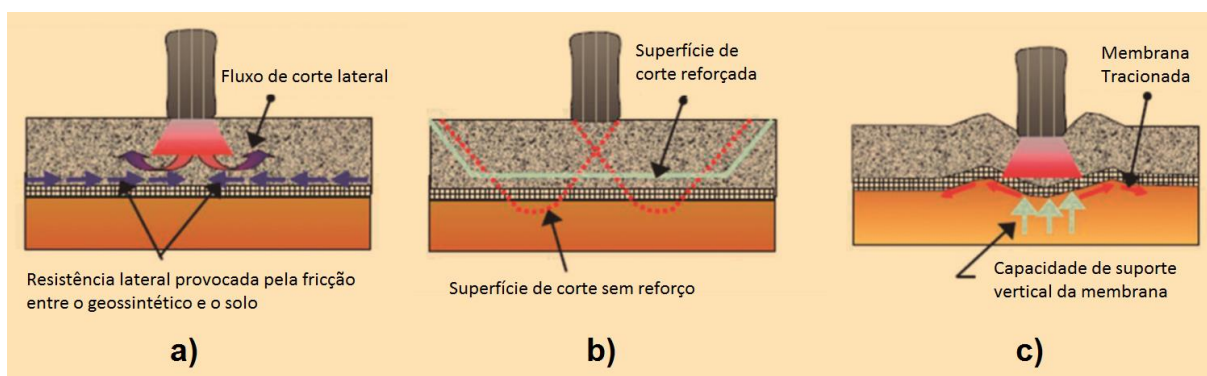


Figura 2.6: Mecanismos provocados pelo geossintético de reforço: a) Resistência lateral; b) Aumento da capacidade de suporte; e c) Efeito de membrana tracionada. (Adaptado de Zornberg, 2013)

2.5.2. Principais tipos de geossintéticos

Nesta secção irá ser realizada uma reflexão sobre vários tipos de geossintéticos que têm sido estudados e, em alguns casos, para o reforço de pavimentos flexíveis. Para a organização dos diversos tipos de geossintéticos, foi executada numa primeira análise, um quadro resumo que visa contemplar as várias fontes de informação para cada um dos tipos de geossintético em análise, bem como quais os ensaios realizados em campo ou em laboratório para esse geossintético. Esse quadro consta no Anexo A.

a) Geotêxteis tecidos e não tecidos

De acordo com Pinto (2005) os polímeros mais utilizados na constituição, tanto de geotêxteis tecidos, como não tecidos, são o polipropileno, o poliéster, o polietileno e a poliamida. Os geotêxteis tecidos apresentam uma estrutura regular de filamentos entrelaçados paralela e perpendicularmente, sendo caracterizados por constituírem uma malha contínua, com poucos milímetros de espessura. Na Figura 2.7a) é possível observar a estrutura de um geotêxtil tecido. No fabrico deste tipo de geotêxtil, os componentes geralmente utilizados são o monofilamento, o multifilamento ou uma combinação dos dois. Mesmo assim, segundo Lopes (2001), atualmente têm-se utilizado outros tipos de componentes básicos, sendo também comum o fabrico destes materiais com tiras.

Em relação aos geotêxteis não tecidos, estes são formados com uma distribuição de filamentos aleatória, tal como é possível observar na Figura 2.7b). Os filamentos utilizados no seu fabrico poderão ser de dois tipos: contínuo ou fibra. Este tipo de geotêxtil não tecido requer um processo de ligação para a formação da sua estrutura. Os processos de ligação poderão ser mecânicos, térmicos ou químicos.

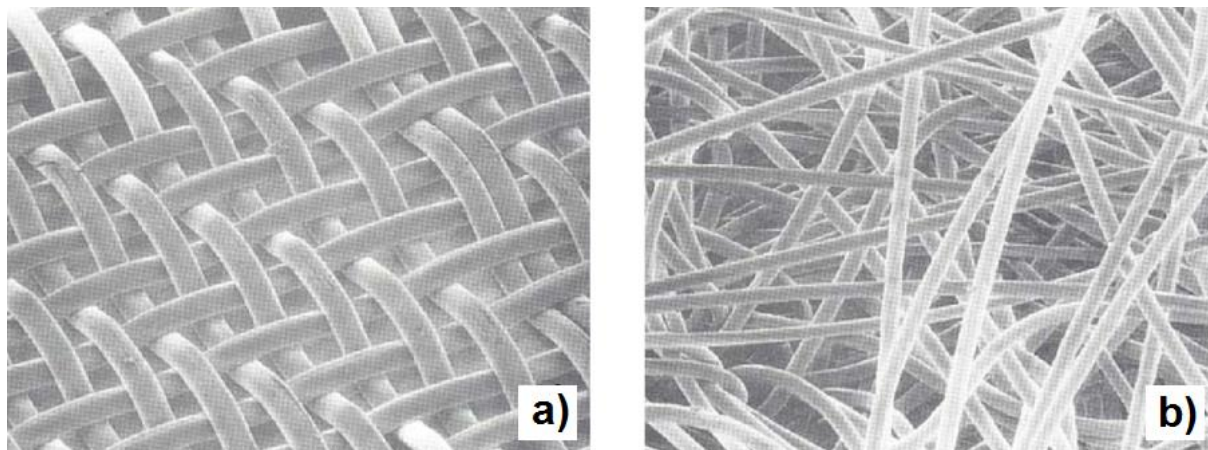


Figura 2.7: Estrutura dos geotêxteis: a) Geotêxtil tecido; b) Geotêxtil não tecido. (Adaptado de Pinto, 2005)

Os dois tipos de geotêxteis apresentam diferenças ao nível da sua estrutura, como se explicitou anteriormente. Estas diferenças irão também verificar-se ao nível do seu desempenho. Cada tipo de geotêxtil será direcionado para diferentes funções onde a sua estrutura tenha um melhor comportamento face às ações exteriores. Por exemplo, numa análise hidráulica, verifica-se que o geotêxtil tecido terá uma distribuição homogénea dos poros, enquanto o geotêxtil não tecido terá uma distribuição aleatória dos poros. Este facto altera a forma como o geotêxtil se comporta para determinado caso específico.

Relativamente aos geotêxteis tecidos, estes têm como principais funções a drenagem, a separação e o controlo da erosão superficial do pavimento. Os geotêxteis não tecidos são utilizados também para opções de drenagem e filtragem, acrescentando a função de estabilização do solo, pelo que poderá constituir uma boa alternativa, caso se trate de um pavimento com má qualidade de solo de fundação, pois poderá ter um papel de reforço do solo.

Uma vez que a dissertação visa materiais que comportem a função de reforço, estes geossintéticos não apresentam tantos exemplos de estudo, devido às suas principais funções. Assim, os exemplos apresentados, não são os mais comuns para este tipo de materiais, mas sim para o tipo de função em estudo.

- **Geotêxtil tecido de fibra orgânica**

Relativamente ao estudo de geossintéticos com a função de reforço do pavimento, terá interesse estudar a possível utilização de fibras naturais como material constituinte. Este é um material que, embora menos utilizado, é também bastante útil para as funções que se pretendem de um geossintético. Uma vez que se trata de uma fibra orgânica, este material é biodegradável e a longo

prazo acaba por consolidar, passando posteriormente à sua decomposição. Na Figura 2.8 é possível observar o aspeto de um geotêxtil constituído por fibra orgânica.



Figura 2.8: Geotêxtil de fibra orgânica. (Basu et al, 2009)

A aplicação deste material é bastante favorável em situações onde apenas se pretende um reforço inicial do pavimento, adquirindo gradualmente, com a passagem de veículos, a consolidação final. Esta solução, também poderá ser utilizada em casos onde se pretenda uma solução de carácter temporário, uma vez que este geotêxtil é economicamente mais viável. Assim sendo, o principal campo de aplicação deste material é em estradas sem revestimento de camada ligada, uma vez que estas têm uma menor concentração de tráfego.

Num estudo desenvolvido por Basu et al (2009) este é um material que tem vindo a ser desenvolvido em estradas sem revestimento de camada ligada. Neste caso, o geossintético não é composto apenas por fibra orgânica vegetal, mas engloba também uma mistura de polietileno de alta densidade. Este material desempenha, com bastante eficiência, as funções de separação e reforço para uma quantidade não muito elevada de tráfego, a função esperada para uma estrada sem revestimento de camada ligada. Uma vez que é composto por uma mistura de materiais, acaba por não se decompor na sua totalidade, permanecendo sempre uma estrutura que garantirá a separação das camadas.

Depois de decorrido o ensaio, com o objetivo de avaliar o desempenho do geotêxtil numa situação prática, concluiu-se que quando o geotêxtil foi colocado diagonalmente, foi quando se obtiveram os resultados melhores a nível de resistência, conferindo maior suporte ao pavimento e suportando uma maior força de rotura, quando comparado com o geotêxtil composto apenas por polietileno de alta densidade. Outra das vantagens que se retirou do ensaio foi que este material acaba por ser mais económico, quando comparado com o mesmo material sem a mistura de polietileno, ou seja, se fosse 100% fibra vegetal.

Adicionalmente, decorridos 18 meses, efetuou-se uma visita ao local onde o geotêxtil tinha sido aplicado e não existiam marcas nem vestígios de rodeiras. Na Figura 2.9b) é possível visualizar o aspeto da estrada na altura mencionada. Na restante estrada, onde não foi aplicado qualquer tipo de reforço ou separação, conseguiam-se visualizar marcas de rodeiras que iam desde 5 a 35 mm de profundidade, tal como é possível observar na Figura 2.9c). Sublinha-se que a parte da estrada com a aplicação do geotêxtil obteve um ganho significativo no que diz respeito à capacidade de suporte da estrada (cerca de 73% em comparação com a estrada onde não foi aplicado geotêxtil).



Figura 2.9: Condições da estrada: a) Inicialmente, sem reforço; b) Decorridos 18 meses da aplicação do geotêxtil de reforço; e c) Decorridos 12 meses sem a aplicação de geotêxtil. (Adaptado de Basu et al, 2009)

Um outro estudo realizado por Subaida et al (2009), também com o objetivo de investigar o efeito da utilização deste material foi possível tirar algumas conclusões. Quando o geossintético foi aplicado em camadas finas, ocorreu uma melhoria considerável na capacidade de suporte, principalmente no caso em que o geotêxtil se encontrava a meia altura da camada de base, segundo consta no artigo de Subaida et al (2009). Já em camadas mais espessas, a aplicação do geotêxtil melhorou o confinamento da camada de fundação e reduziu consideravelmente a ação das forças horizontais, embora com melhores resultados quando aplicada entre a camada de fundação e a camada de base.

Mais uma vez, com a aplicação do geossintético, ocorreu uma diminuição significativa do efeito do esforço vertical permanente, uma vez que este material conseguiu produzir uma redistribuição deste esforço, de maneira a criar uma área de resistência para a carga pontual. Assim, a deformação

vertical imposta sobre a área de contacto, rodado-pavimento, seria bastante maior caso não se aplicasse o geossintético. Contudo, segundo o autor, a deformação apresentou uma maior taxa de redução, quando foi aplicada a meia altura da camada de base. Importa sublinhar que a localização do geotêxtil na camada de base, afetou a eficiência das camadas mais espessas.

- **Geotêxtil não tecido de polipropileno**

No caso do artigo realizado por Sivapragasam et al (2010) pretende-se melhorar a capacidade de suporte da fundação uma vez que o material constituinte desta camada era constituído substancialmente por argila, *High Plasticity Inorganic Clay*. Para a realização deste procedimento experimental foram constituídas amostras com a inserção de geotêxteis não tecidos de polipropileno a várias profundidades da estrutura do pavimento ensaiado. Depois de vários ensaios concluiu-se que qualquer que fosse a profundidade de colocação do geotêxtil, os valores de CBR e UCC, eram sempre superiores quando comparados com a amostra sem qualquer geotêxtil. Mesmo assim, a amostra com melhores resultados foi aquela em que se aplicou o geotêxtil a uma profundidade média.

- b) Geogrelhas**

Tal como o nome o sugere, este tipo de geossintético apresenta a configuração de uma grelha, podendo variar o tamanho da abertura. No fabrico das geogrelhas, estas poderão constituir “uma ligação de pontos de intersecção de barras perpendiculares de polímero ou por perfuração, seguida ou não de estiramento de uma folha de polímero (geogrelhas de ligações integrais)” (Lopes, 2001). Na Figura 2.10 é possível observar o aspeto final de uma geogrelha de polipropileno. Tal como apresentado anteriormente na dissertação realizada por Pinto (2005), os polímeros mais utilizados no fabrico de geogrelhas são o polietileno, o polipropileno, o poliéster e a poliamida. Para além da utilização de polímeros, mais recentemente têm vindo a ser estudadas e utilizadas geogrelhas compostas por fibra de carbono ou fibra de vidro revestidas de betume.



Figura 2.10: Geogrelha de polipropileno. (TENSAR, s.d.)

Como referido inicialmente, têm sido executados variados estudos relativos à utilização de geossintéticos. Relativamente às camadas de superfície de pavimento, tanto em novas construções

como em reabilitação de pavimentos existentes, podem ser utilizadas geogrelhas para melhorar o comportamento a ações cíclicas provenientes de tráfego, aumentando a capacidade de suporte do pavimento, e ajudando a prevenir ou retardar o processo de reflexão de fendas.

As geogrelhas têm sido desenvolvidas de modo a conferirem a capacidade de suporte adequada à camada onde se inserem. Para isso, estes geossintéticos são incorporados com fibras de elevado módulo de elasticidade, pois estas asseguram maior capacidade de absorção de forças para um reduzido valor de extensão.

Assim sendo, faz-se de seguida uma breve descrição e comparação de cada tipo de geogrelha utilizada tanto em camada de superfície do pavimento, como em camadas mais profundas, com vista a perceber em que situações a aplicação de geogrelha fará mais sentido.

- **Geogrelha de fibra de carbono**

A técnica de reforço com a utilização de Geogrelhas de fibra de carbono, revestidas de emulsão de betume designado como “pré-betuminada”, é uma técnica relativamente recente que tem vindo a ser utilizada exclusivamente no reforço de toda a superfície do pavimento em alguns países da Europa. Esta grelha tem como objetivo o reforço estrutural do pavimento, com o aumento da capacidade de carga e a diminuição da extensão, podendo também ser utilizada para a reabilitação de pavimentos de modo a combater a reflexão de fendas. Apesar de ter uma pré impregnação de betume, não coloca em causa a aderência entre camadas (S&P, s.d.). Na Figura 2.11 apresenta-se o aspeto da geogrelha em questão.



Figura 2.11: Geogrelha de fibra de carbono pré-betuminada. (S&P, s.d.)

Segundo Dourado e Scherer (2005) num ensaio de campo na Suíça, foram executadas medições de deflexão a todo o comprimento da via com o objetivo de determinar se era possível ocorrer redução na espessura, onde se aplicou uma nova camada de pavimento, com 4 cm de espessura, que em algumas secções se apresentava reforçada com geogrelha de fibra de carbono pré-betuminada. Em

conclusão desse ensaio, determinou-se que a aplicação da geogrelha era equivalente a 3 cm de espessura de uma nova camada do pavimento.

Foi também elaborado um outro estudo conduzido por Graziani et al (2014) em campo perto da cidade de Ancona, em Itália. Este ensaio teve como objetivo o estudo do efeito de geossintéticos de reforço aplicados em campo quando sujeitos a cargas reais. O estudo foi conduzido em Itália e tratava-se de uma estrada secundária com bastante tráfego pesado. Para além disto, pretendia-se também estudar o efeito de diferentes geogrelhas. Para isso a totalidade da estrada foi dividida em três secções: com geogrelha de fibra de carbono; com geogrelha de fibra de vidro; e sem qualquer tipo de reforço.

As conclusões deste estudo foram:

- As extensões na secção onde se aplicou a geogrelha de fibra de carbono foram consideravelmente reduzidas. Mesmo assim, a extensão horizontal na secção de geogrelha de polímero de fibra de vidro aumentou ligeiramente face aos resultados sem qualquer reforço;
- Relativamente à rigidez relativa para a geogrelha de fibra de carbono, esta teve um aumento de 25%, enquanto que a geogrelha de polímero de fibra de vidro teve um aumento de 50%, mais uma vez referente à situação sem qualquer reforço.

Foram realizados ensaios de carga que evidenciaram resultados bastante positivos e esclarecedores quanto às propriedades da geogrelha de fibra de carbono. Quanto à geogrelha de polímero de fibra de vidro, que provavelmente seria demasiado rígida, poderá ter conduzido a uma aderência incorreta. Mesmo assim, ambas obtiveram melhores resultados comparativamente com a seção sem qualquer tipo de reforço.

- **Geogrelha de fibra de vidro**

Esta técnica tem vindo a ser desenvolvida nos últimos anos em vários países da Europa. As geogrelhas de fibra de vidro têm como principal objetivo combater a reflexão de fendas, de modo a aumentar a durabilidade do pavimento.

Mesmo assim, foi registado um estudo elaborado por Ferrotti et al (2012), onde esta geogrelha foi ensaiada para reforço das camadas de superfície do pavimento. Sabe-se que as geogrelhas poderão ter diversos comportamentos, devido às suas características como materiais constitutivos, pré-revestimento, geometria da grelha ou mesmo a sua localização na estrutura do pavimento. Assim, este estudo pretendeu dar especial atenção à utilização de variados compostos no pré-revestimento de uma geogrelha de fibra de vidro.

No início do estudo, houve a necessidade de se realizar uma avaliação dos vários revestimentos a aplicar na geogrelha, verificando a sua capacidade de aderência a uma camada de misturas betuminosas. Daqui resultou a escolha de uma resina epoxídica termo-endurecível, pois era o material que apresentava melhor resistência à tração.

Relativamente ao comportamento de corte entre camadas, verificou-se que comparativamente com uma amostra sem reforço, qualquer reforço com a geogrelha de fibra de vidro tinha um desempenho significativamente superior. No entanto, nem todas as amostras maximizaram a ligação entre camadas, obtendo-se alguns dos resultados prejudiciais para o comportamento estrutural do pavimento.

É necessário acrescentar que as aplicações em campo bem-sucedidas de camadas superficiais reforçadas dependem significativamente do geossintético escolhido, depois de uma seleção apropriada e do seu posicionamento e instalação em campo, tal como mencionado no início do capítulo (Dourado e Scherer, 2005).

- **Geogrelha de polipropileno**

O estudo formulado por Palmeira e Antunes (2010) teve também como objetivo o estudo do efeito da aplicação de geossintéticos no reforço de pavimentos, aplicados numa estrada sem revestimento de camada não ligada. Para tal foram ensaiadas três amostras: sem qualquer reforço; com geogrelha de polipropileno; e com geotêxtil também de polipropileno. Na Figura 2.12 é possível visualizar o aspeto da geogrelha e do geotêxtil de polipropileno utilizados no ensaio.

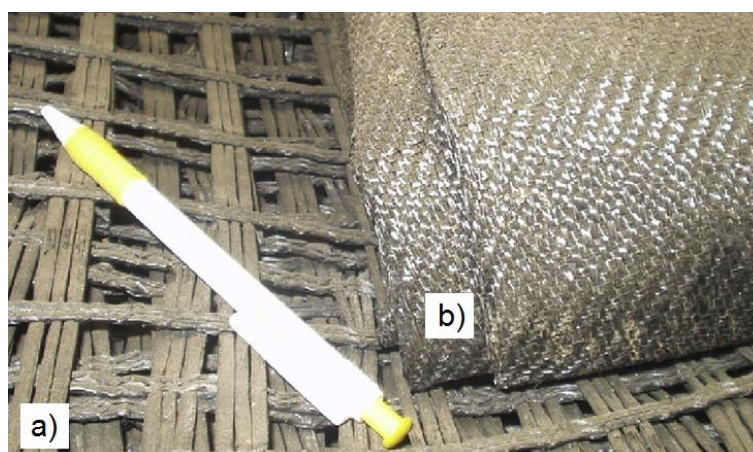


Figura 2.12: a) Geogrelha de polipropileno; e b) Geotêxtil de polipropileno. (Adaptado de Palmeira e Antunes, 2010)

Depois de realizados os ensaios, concluiu-se não só que com a utilização de reforço o número de ciclos que o pavimento suportava, sem a formação de rodeiras, aumentou consideravelmente, como ocorreu uma redução do incremento de tensão vertical transmitida à fundação.

Relativamente aos dois tipos de geossintéticos utilizados para reforço do pavimento neste estudo, concluiu-se que a geogrelha obteve um reforço mais eficiente uma vez que apresentou maior restrição às ações laterais. A presença de material de reforço mostrou que ocorreu uma redução significativa no que diz respeito aos esforços e extensões verticais transmitidos à fundação. Para além disto, foi também efetuado um estudo de custo-benefício que mostrou que apesar do grande

aumento inicial no custo do pavimento com o reforço, a redução no custo de manutenção acabou por ser uma mais-valia no custo total do pavimento a longo prazo.

Também no artigo desenvolvido por Stephen Archer (2008) se pretendia estudar o efeito da aplicação de geossintéticos de reforço em pavimentos rodoviários. Para isso, foi elaborada uma comparação entre as três amostras mencionadas no estudo anterior. Mais uma vez foram retiradas as mesmas conclusões, dando especial atenção ao total que se acabou por poupar no custo final do pavimento, com pelo menos uma das hipóteses, geogrelha ou geotêxtil de polipropileno, na análise custo-benefício efetuada pelo autor. Para além disto, também a geogrelha de polipropileno obteve melhores resultados, conseguindo assegurar uma menor espessura para o mesmo valor de CBR, em ambos os métodos ensaiados no artigo.

Mais uma vez, para o estudo do efeito da utilização de geossintéticos de reforço surge um outro artigo efetuado por Abu-Farsakh e Chen (2011). Conclui-se também, que ao aplicar amostras de geogrelhas de polipropileno no reforço da camada de fundação do pavimento, o seu desempenho melhorou, mais uma vez, significativamente. Com a aplicação deste material, o pavimento sofreu menores deformações para uma maior quantidade de ciclos de carga e, apresentou um melhor desempenho ao longo do tempo.

Relativamente às curvas de deformação obtidas neste artigo, estas mostram que houve uma melhoria proporcional do pavimento, face ao aumento do módulo de deformabilidade da geogrelha. Ou seja, ao colocar uma geogrelha de polipropileno biaxial, o TBR obtido foi de 6,1 e ao colocar uma geogrelha de polipropileno triaxial, com maior módulo de elasticidade, o valor de TBR obtido foi de 6,4. Com a aplicação da geogrelha como reforço do pavimento, esta atuou como redistribuidora de esforços, ou seja, ocorreu uma expansão da força aplicada a uma maior área, em vez de apenas ao local de contacto. Deste modo, grande parte da fundação resistiu ao esforço vertical aplicado. Para além disto, a amostra com melhor desempenho foi aquela onde se aplicou a geogrelha a um terço da parte superior da camada de base e não a metade da camada ou entre camadas. É ainda necessário acrescentar, que um dos fatores que também teve influência no desempenho da geogrelha foi a sua aplicação, uma vez que é necessário que se criem condições para uma boa aderência, entre a geogrelha e as camadas, pois esta ligação criará maior nível de resistência.

Em conclusão, tal como já referido inúmeras vezes, a aplicação de geossintéticos em estradas com revestimento de camada ligada acarretará benefícios no que toca à sua capacidade de suporte do pavimento, redução da espessura das camadas, diminuição de deformações e retardação da formação de rodeiras.

c) Geocélulas

Segundo Bathurst (s.d.b) “as geocélulas são redes tridimensionais, relativamente espessas, construídas a partir de tiras poliméricas. As tiras são ligadas de maneira a formar células interligadas que são preenchidas com solo”.

O principal objetivo desta rede é o confinamento do material, ou seja, quando o material de uma determinada camada apresenta baixa capacidade de suporte, este geossintético proporciona uma distribuição dos esforços da totalidade da carga aplicada, gerando menos solicitações nas camadas adjacentes da estrutura do pavimento. Para além do confinamento do material, a geocélula desempenha também funções de reforço, barreira, separação e controlo da erosão superficial. Na Figura 2.13 é possível visualizar o aspeto da estrutura de uma geocélula.



Figura 2.13: Geocélula (Geosystems, s.d.).

Este tipo de geossintético é frequentemente utilizado no caso onde a fundação do terreno não possui a capacidade de suporte adequada. Deste modo a aplicação da geocélula vai conferir maior resistência reduzindo as deformações e as forças verticais impostas entre o leito do pavimento e a camada de base ou sub-base.

Segundo um ensaio concebido por Thakur et al (2012), pretendeu-se estudar o comportamento de um pavimento que continha geocélulas reforçadas na camada de base, com um dos materiais mais utilizados nos Estados Unidos. Esse material tratava-se de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) e basicamente consistia no reaproveitamento e reciclagem de pavimentos antigos para constituírem parte da camada de base. O problema associado a esta situação foi o facto de este material, por possuir revestimento de camada ligada, ter causado assentamentos permanentes excessivos ao nível da camada de base onde foi aplicado. Assim, para contornar este problema, utilizaram-se geocélulas para que houvesse uma minimização das deformações, tendo uma resposta mais coesa às ações de tráfego pesado. Ainda assim, a camada de base assentou sobre um solo fraco, ou seja, não teve boas características de resistência a ações de tráfego pesado. Para além disto, no ensaio, foi também colocado um geotêxtil entre a camada de base (a que continha a geocélula) e a fundação.

Neste ensaio, foram consideradas várias amostras tais como, sem reforço algum, com reforço de geocélula na camada de base com diferentes espessuras de RAP e também diferentes níveis de compactação. Depois da comparação dos resultados obtidos para as diversas amostras, concluiu-se que a aplicação da geocélula melhorou consideravelmente o desempenho do pavimento, face às

condições presentes na fundação, demonstrando ter uma resposta bastante estável face às ações de carga cíclica. Na Figura 2.14 é possível observar o comportamento da deformação permanente, face à aplicação das geocélulas.

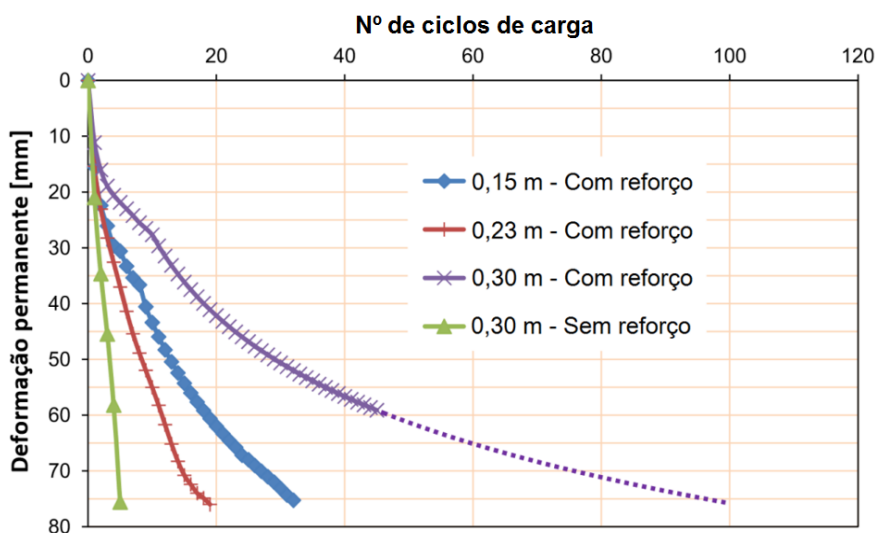


Figura 2.14: Relação entre a deformação permanente e o número de ciclos de carga. (Adaptado de Thakur et al, 2012)

Neste caso, tal como esperado, a solução sem a aplicação de qualquer tipo de reforço, mesmo sendo bastante espessa, é aquela que resiste ao menor número de passagens do eixo padrão. Também por observação da Figura 2.14 é possível verificar que a camada com 0,3 m de espessura com a inclusão de reforço foi aquela que obteve maior resistência à deformação permanente. É de notar que a camada de 0,15 m de espessura obteve melhores resultados que a de 0,23 m. Tal ficou a dever-se ao facto desta ter menor grau de compactação que a menos espessa.

Houve também uma melhoria no que toca à redução das tensões verticais transmitidas à fundação, ocorrendo uma distribuição por uma área mais ampla. O material recuperado (RAP) foi considerado perfeitamente capaz de ser utilizado como base, com a aplicação da geocélula para reforço desta. Para além disto, esta solução poderá ser também bastante viável em estradas sem revestimento de camada ligada, pois com o aumento da capacidade de carga do pavimento, a resistência a outros fatores externos aumentará também. Desta forma, poderá compensar a ausência das camadas superficiais betuminosas (desgaste).

Relativamente à aplicação de geocélulas em estradas sem revestimento de camada ligada, foram conduzidos diversos estudos, como por exemplo a experiência laboratorial de Yang et al (2012), onde foram ensaiadas diversas amostras de estradas sem revestimento de camada ligada, com e sem reforço de geocélulas, à ação de cargas pesadas cíclicas. Este estudo demonstrou que com a aplicação de geocélulas para reforço do pavimento, este tornou-se bastante mais estável e reduziu consideravelmente a deformação permanente. Para ter uma ideia mais clara, uma força por eixo de 80 kN sem reforço de geocélula com apenas uma passagem, atinge o estado de rotura, com reforço, só depois de 5 000 passagens atinge o mesmo estado. Para além disto, é de notar que quanto maior

for a espessura da geocélula aplicada na camada, menor será a deformação vertical verificada no pavimento.

2.6. Dimensionamento e modelação do reforço

2.6.1. Princípios de dimensionamento

Na construção de pavimentos flexíveis, é essencial ter em conta que o solo de leito do pavimento necessita de possuir uma determinada capacidade de suporte, por forma a evitar assentamentos deste, provocados pelas cargas associadas ao tráfego. Para solos que não apresentem uma capacidade de suporte adequada, é necessário proceder à sua estabilização, ou seja, ao aumento do CBR desses solos. Para aumentar este parâmetro, podem implementar-se diversas soluções nomeadamente: a escavação do solo com baixa capacidade, a estabilização química ou a utilização de geossintéticos (Mounes et al, 2011).

Em seguida são apresentados os princípios de dimensionamento do reforço com recurso a geossintéticos para estradas sem e com revestimento de camada ligada.

O dimensionamento do reforço de estradas sem revestimento de camada ligada tem como base o efeito da membrana tracionada. Tal como mencionado anteriormente, o reforço irá criar uma reação vertical para resistir aos esforços no topo do pavimento. Na Figura 2.15 a) pode observar-se, com mais detalhe, o comportamento do geossintético numa estrada sem revestimento. Assim, segundo Jan-Maarten (2004) é importante ter em consideração que, para este tipo de pavimentos, um dos parâmetros a ter em conta é a rigidez do geossintético de reforço.

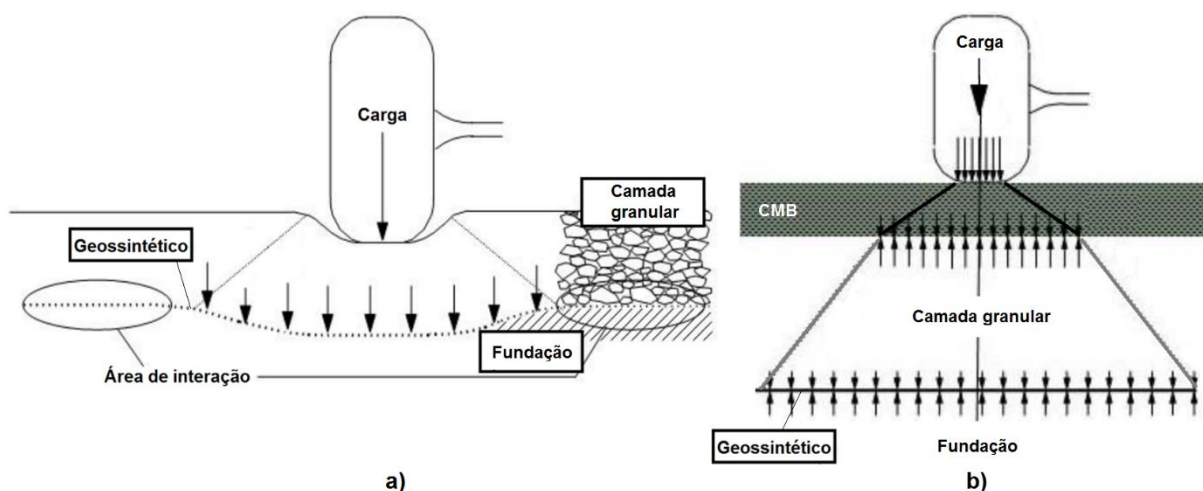


Figura 2.15: Modelo de dimensionamento do reforço: a) de uma estrada sem revestimento de camada ligada; e b) de uma estrada com revestimento de camada ligada. (Adaptado de Jan-Maarten, 2004)

Relativamente a estradas com revestimento de camada ligada, o dimensionamento do reforço tem por base não só o mecanismo do efeito da membrana tracionada, como também o do aumento da capacidade de suporte. Com a colocação do geossintético de reforço, a carga aplicada é distribuída

por uma área maior na camada de leito do pavimento. Deste modo, quanto maior for a rigidez da camada de fundação, maior será essa superfície distribuidora da carga, tal como ilustrado na Figura 2.15 b) (Jan-Maarten, 2004).

- **Índice de eficiência do geossintético de reforço**

Para quantificar a eficiência do geossintético no reforço do pavimento é utilizado o TBR designado por *Traffic Benefit Ratio*. Este índice pode ser calculado conforme a equação (2.1) que representa a relação entre o número de ciclos de carga num pavimento reforçado e o número de ciclos de carga suportada num pavimento não reforçado, com a mesma simetria e materiais constituintes.

$$TBR = \frac{N_R}{N_U} \quad (2.1)$$

Onde: *TBR* – *Traffic Benefit Ratio* (Índice de eficiência de reforço no tráfego)

N_R – Número de ciclos de carga suportada num pavimento reforçado

N_U – Número de ciclos de carga suportada num pavimento não reforçado

Tal como ilustrado na Figura 2.16, este índice tem sido bastante útil para determinar o número de ciclos de carga que um pavimento com um geossintético de reforço suporta, quando comparado com um pavimento sem qualquer reforço.

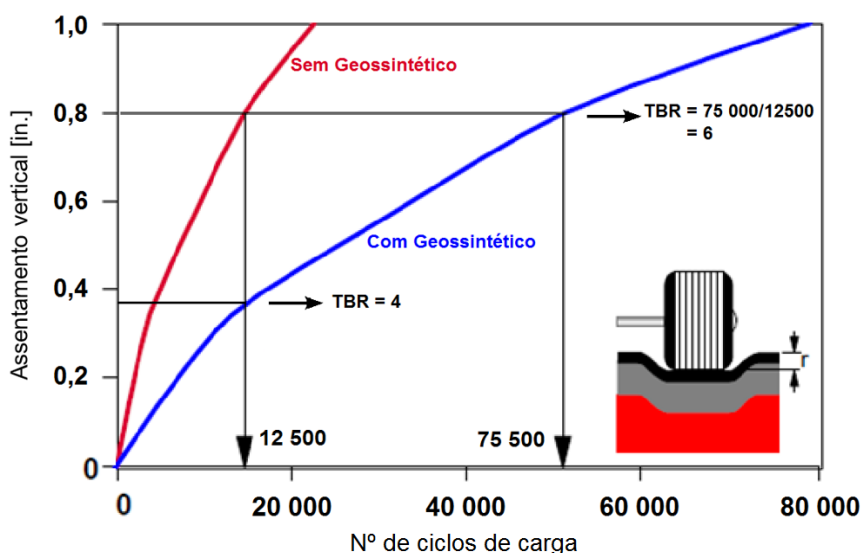


Figura 2.16: Valores de TBR típicos para um pavimento com e sem geossintético de reforço que alcança um determinado assentamento vertical. (Adaptado de Mounes et al, 2011 e de Zornberg, 2013)

Com vista à análise da redução dos custos iniciais de obra, por via de uma redução no custo dos materiais utilizados no pavimento, tem sido utilizado o índice BCR. Este índice relaciona a espessura reduzida da camada de base com geossintético, com a espessura da camada de base sem reforço, para o mesmo número de passagens do eixo padrão. Este índice é definido pela equação (2.2).

$$BCR = \frac{T_R}{T_U} \quad (2.2)$$

Onde: BCR – Base Course Reduction (Redução da espessura da camada de base)

T_R – Espessura reduzida da camada de base com geossintético de reforço

T_U – Espessura da camada de base sem reforço

2.6.2. Estudos de modelação

Para além de todos estes casos elaborados em laboratório e em campo, têm também sido efetuados estudos de modelação para analisar a ação de geogrelhas ou geotêxteis. Esta análise permite quantificar a informação de modo a perceber o comportamento e o impacto da aplicação dos geossintéticos com diferentes condições no pavimento. Diferentes programas foram já utilizados para reproduzir, por elementos finitos, o impacto que a aplicação de um geossintético poderá ter quando aplicado sob diferentes características.

É o caso de um estudo desenvolvido por Saad et al (2006) com a utilização do *software ADINA*, onde foi conduzida uma análise por elementos finitos em 3D, de modo a investigar o benefício da aplicação de uma geogrelha de reforço, enquanto se varia a qualidade dos materiais e a espessura da camada de base, analisando as várias soluções formuladas relativamente aos critérios de fadiga e de deformação permanente. Relativamente à fadiga, verificou-se que quando a geogrelha se localizava na interface entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base, era possível reduzir bastante o valor das extensões de tração. Tal valor chegou mesmo a reduzir até 48% e foi de notar que esta redução era praticamente independente da espessura da camada de base ou da qualidade da fundação. Para a redução das extensões de compressão e assentamentos verticais, verificou-se que quando se utilizavam camadas de base com espessuras mais reduzidas, este valor era mais pronunciado.

Outro estudo, com a utilização do *software ABAQUS*, onde também se simulou, por análise de elementos finitos 3D, a ação de uma geogrelha para o reforço de pavimentos de reduzido tráfego, foi desenvolvido por Kim e Lee (2013). Conclusões semelhantes foram obtidas, com a aplicação da geogrelha ocorreu uma melhoria significativa no que diz respeito aos assentamentos verticais, especialmente nos casos em que a espessura da camada de misturas betuminosas apresentava uma espessura mais fina. Nos casos em que a fundação era mais fraca, quando se aplicou a geogrelha as reduções foram superiores comparativamente com os casos em que a fundação tinha um maior módulo de deformabilidade. Na Figura 2.17 apresenta-se uma das imagens deste estudo que é bastante elucidativa, no que toca ao comportamento das extensões de tração face à aplicação da geogrelha de reforço. Na Figura 2.17a) é possível visualizar como variam as extensões de tração quando não é colocado qualquer reforço e na Figura 2.17b) consegue observar-se a diferença de comportamento do pavimento ao aplicar a geogrelha.

Outro trabalho desenvolvido por Benmebarek et al (2013) utiliza o *software FLAC* e mais uma vez foram obtidos resultados bastante vantajosos para a utilização de geossintéticos. Ocorre uma grande

melhoria na capacidade de suporte do solo e a máxima tensão na geogrelha tem um aumento proporcional à medida que a rigidez na estrutura aumenta. Para além disto, este estudo incide bastante sobre o efeito do reforço da rigidez no aumento da capacidade de suporte.

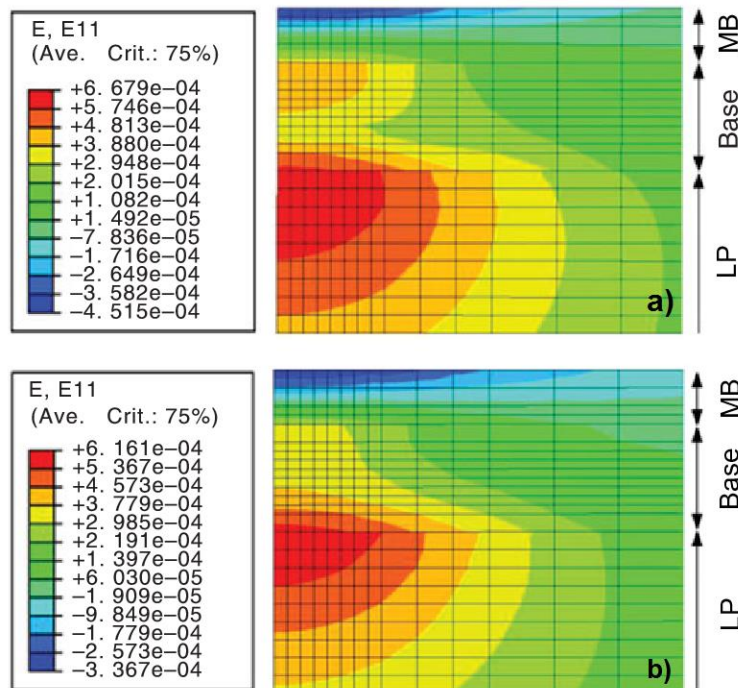


Figura 2.17: Comportamento da extensão de tração sob o centro de aplicação da carga: a) Leito do pavimento fraco sem reforço; e b) Leito do pavimento fraco com aplicação de geogrelha de reforço. (Adaptado de Kim e Lee, 2013)

É possível perceber que existem já bastantes estudos desenvolvidos em análise de elementos finitos sobre este tema. Para além disso, os resultados das análises descritas e de outros artigos consultados provaram que a utilização de geossintéticos em estradas com revestimento de camada ligada terão sempre vantagens para a estrutura do pavimento. No entanto, é necessário acrescentar que um dos fatores que poderá alterar esta vantagem é a aderência solo-pavimento pois, caso esta não se verifique, a aplicação do geossintético poderá tornar-se prejudicial ao longo do tempo de vida de um pavimento rodoviário.

2.7. Síntese da experiência em Portugal

Em Portugal, nos últimos tempos, têm sido aplicados geossintéticos de reforço em pavimentos rodoviários. Segundo um estudo realizado no âmbito do GT2 – Reforço de Geomateriais, da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT) (Lima, s.d.), entre 2001 e 2012, foram aplicados cerca de 500 000 m² de geomateriais na camada de leito do pavimento, em cerca de 45 obras rodoviárias sob gestão direta da Estradas de Portugal, S.A..

De acordo com o estudo, “verifica-se que é nas obras de reabilitação de pavimentos que mais se aplicam geomateriais ao nível da camada de leito do pavimento.” Pensa-se que tal resultado estará

relacionado com a execução de saneamentos, devido à fraca capacidade de suporte dos terrenos de fundação do pavimento. Na Figura 2.18 é possível observar a distribuição da totalidade dos geomateriais aplicados por tipo de obra. Pela imagem constata-se que os geossintéticos têm sido utilizados substancialmente para a reabilitação de pavimentos, em cerca de 58% dos casos, mas também com alguma frequência na construção de novos pavimentos, em cerca de 24%.

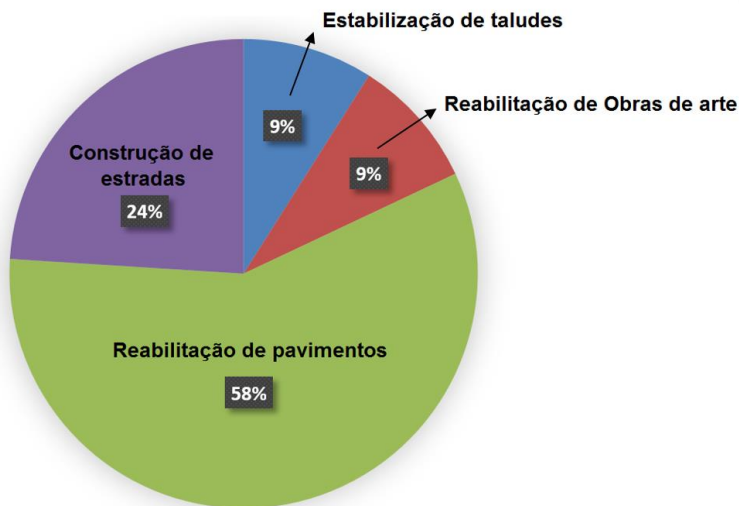


Figura 2.18: Distribuição por tipo de obra de geomateriais em leito do pavimento entre 2001 e 2012. (Lima, s.d.)

Relativamente ao tipo de material utilizado no reforço da fundação do pavimento, é possível constatar pela Figura 2.19 que o geomaterial mais utilizado é o geotêxtil com 94% da totalidade das aplicações, enquanto que a geogrelha apenas apresenta 6% de aplicações.

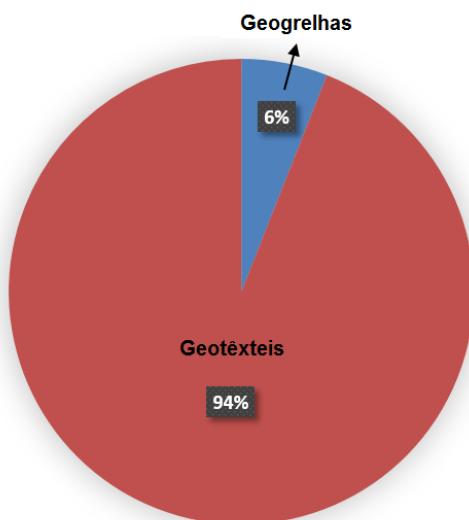


Figura 2.19: Distribuição por tipo de geomaterial em leito do pavimento entre 2001 e 2012. (Lima, s.d.)

3. Análise numérica de casos adaptados à experiência portuguesa

3.1. Considerações iniciais

Com o objetivo de perceber o impacto da aplicação de geossintéticos em pavimentos dimensionados e construídos em Portugal, foi desenvolvido um estudo paramétrico. Para tal, com base em JAE (1995) foram dimensionadas estruturas de pavimento, onde se fez variar ações de tráfego, espessuras das camadas e propriedades dos materiais.

Para avaliar a influência da utilização de um geossintético nestas estruturas, fez-se ainda variar a localização deste ao longo da profundidade da estrutura do pavimento. Todas estas considerações foram importantes para a análise de resultados e para entender o comportamento deste material em cada situação.

Para permitir uma análise específica e simples, onde fosse possível modelar o geossintético no pavimento, utilizou-se o método de elementos finitos. Este permitiu programar as diversas hipóteses que se pretendiam estudar e, retirar os dados necessários para uma avaliação detalhada do comportamento da estrutura, em conjunto com o material, de modo a perceber as condições em que a aplicação tem maior viabilidade.

Em seguida são descritas as condições de base e simplificações consideradas na programação do modelo em análise.

3.2. Conceção das estruturas do pavimento

Para analisar o desempenho de um pavimento rodoviário com a aplicação de geossintéticos para reforço do mesmo, desenvolveu-se um estudo paramétrico. Para o efeito foram desenvolvidas várias hipóteses para avaliar, em termos gerais, a influência da sua aplicação.

Foram definidos três tipos de pavimento base destinados a estudar qual a influência das espessuras das camadas. Para cada tipo de pavimento, definiram-se as espessuras das camadas de base e sub-base, fazendo apenas variar a espessura da camada de misturas betuminosas e as propriedades dos materiais. Na Figura 3.1 podem ser observados os três tipos de pavimento base considerados.

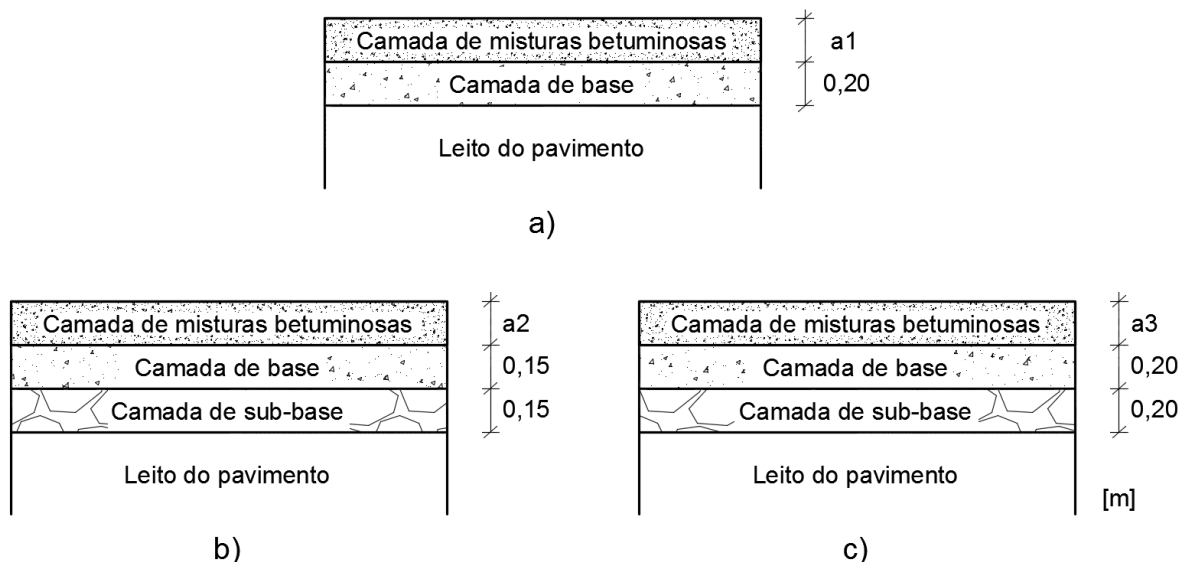


Figura 3.1: Tipos de pavimento base considerados: a) Pavimento tipo 1; b) Pavimento tipo 2; e c) Pavimento tipo 3.

Para cada tipo de pavimento, para além de variar a espessura da camada de misturas betuminosas, fez-se também variar a classe de tráfego e a qualidade dos materiais constituintes das camadas. Estes parâmetros foram considerados na análise, pois interessa perceber a resposta do pavimento à aplicação do geossintético, face à qualidade dos materiais.

Para a determinação das espessuras dos tipos de pavimento em estudo, foi efetuado um pré-dimensionamento para pavimentos flexíveis, segundo JAE (1995), consoante a classe de tráfego e a classe de plataforma consideradas. No Quadro 3.1 apresentam-se os valores das espessuras da camada de misturas betuminosas dimensionados de acordo com a nomenclatura adotada na Figura 3.1, as classes de tráfego (T_k) e a classe de plataforma (F_i). No Quadro 3.1 podem ser consultadas as características dos materiais constituintes, usadas no pré-dimensionamento das diversas camadas, consoante a classe de plataforma, para cada tipo de pavimento.

Quadro 3.1: Valores da classe de plataforma, classe de tráfego e espessura da camada de misturas betuminosas das soluções em estudo.

Classe de plataforma	F ₁			F ₂		
	T ₅	T ₆	T ₇	T ₅	T ₆	T ₇
Pavimento Tipo 1						
a1 ^(*) [m]	(*)	(*)	(*)	0,22	0,18	0,16
Pavimento Tipo 2						
a2 ^(*) [m]	0,25	0,20	0,17	0,20	0,15	0,13
Pavimento Tipo 3						
a3 ^(*) [m]	0,23	0,19	0,17	0,19	0,15	0,13

(*) Estruturas não consideradas

(*) Consultar Figura 3.1

Quadro 3.2: Propriedades dos materiais considerados no pré-dimensionamento das soluções em estudo.

Classe de plataforma	F ₁		F ₂	
Pavimento Tipo 1				
	<i>E</i> [MPa]	<i>ν</i>	<i>E</i> [MPa]	<i>ν</i>
CMB	(¹)	(¹)	4 000	0,40
CB	(¹)	(¹)	120	0,35
LP	(¹)	(¹)	60	0,35
Pavimento Tipo 2 e 3				
CMB	4 000	0,40	4 000	0,40
CB	120	0,35	240	0,35
CSB	60	0,35	120	0,35
LP	30	0,35	60	0,35

(¹) Estruturas não consideradas

Para os pavimentos do tipo 2 e 3, selecionaram-se dois tipos de classe de plataforma, F₁ e F₂, com o intuito de perceber o comportamento do pavimento face à qualidade dos materiais existentes na estrutura. Para o pavimento do tipo 1, apenas foram estudadas soluções com a aplicação de classe de plataforma F₂ uma vez que as condições de compactação e estado hídrico podem ser bastante adversas em situações em que exista apenas uma camada granular. Por esta razão, no Quadro 3.1 e no Quadro 3.2 não se apresentam as características geométricas e mecânicas deste caso.

Para determinar as espessuras das camadas betuminosas, as estruturas consideradas para os pavimentos foram modeladas no programa *BISAR*, de modo a verificar os principais critérios de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

De seguida, apresentam-se os cálculos efetuados para a determinação do dano, equação (3.1), de fadiga e de deformação permanente, tendo em conta os elementos relativos ao dimensionamento pelo método da Shell.

- **Dano:**

$$D = \frac{N_p}{N_{80}} \quad (3.1)$$

Onde: *D* – Dano [%]

N_p – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN pré-dimensionado

N₈₀ – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN admissível

Para a aceitação do dano, considerou-se que o valor deveria estar contido no intervalo de 70 a 80%.

Para as soluções com classe de tráfego T₅ e T₆ os valores para o número de eixos padrão de 80 kN pré-dimensionado (*N_p*) foram consultados em JAE (1995). Para a solução com classe de tráfego T₇

foi efetuado o cálculo do número acumulado de eixos padrão, apresentado na equação (3.2), uma vez que este valor não consta em JAE (1995).

$$N_p = 365 \cdot (TMDA)_p \cdot \frac{(1+t)^p - 1}{t} \cdot \alpha \quad (3.2)$$

Onde: N_p – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN pré-dimensionado

$(TMDA)_p$ – Tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada

t – Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado

p – Período de dimensionamento (20 anos)

α – Fator de agressividade do tráfego

Como os valores de t e α não se encontram tabelados para uma classe de tráfego T_7 , estes foram considerados como semelhantes aos valores da classe anterior, T_6 , sendo adotados os valores de 0,03 e 2, respetivamente. Relativamente ao valor do $(TMDA)_p$, considerou-se o valor máximo para essa mesma classe, 50. No Quadro 3.3 podem ser consultados os valores de N_p considerados, por consulta ou cálculo, para cada uma das classes de tráfego.

Quadro 3.3: Valores de N_p para cada classe de tráfego.

Classe de tráfego	N_p
T_5	$8,0 \times 10^6$
T_6	$2,0 \times 10^6$
T_7	$1,0 \times 10^6$

Para o cálculo do número de eixos padrão de 80 kN, utilizaram-se os elementos relativos ao dimensionamento pelo método da Shell (Shell, 1978) para o critério de fadiga, equação (3.3), e para o critério de deformação permanente, equação (3.4).

- **Critério de fadiga:**

$$\varepsilon_t = (0,856 \cdot V_b + 1,08) \cdot E_m^{-0,36} \cdot N_{80}^{-0,2} \quad (3.3)$$

Onde: ε_t – Extensão horizontal de tração na base da camada de misturas betuminosas (adimensional)

V_b – Percentagem volumétrica de betume no volume total

E_m – Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas [Pa]

N_{80} – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN admissível

- **Critério de deformação permanente:**

$$\varepsilon_c = K_s \cdot N_{80}^{-0,25} \quad (3.4)$$

Onde: ε_c – Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional)

K_s – Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%.

N_{80} – Número acumulado de eixos padrão de 80 kN admissível

Com o auxílio do programa *BISAR*, foi possível obter os valores da extensão de tração na base da camada de misturas betuminosas e da extensão de compressão no topo do solo de fundação, de modo a calcular o número de eixos padrão de 80 kN que o pavimento pré-dimensionado consegue de facto suportar antes de atingir a rutura (N_{80}).

O módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas, como já referido anteriormente para o pré-dimensionamento, foi de 4 000 MPa para todas as soluções. No entanto, com o intuito de estudar mais casos da experiência em Portugal, nas soluções modeladas por elementos finitos fez-se também variar o módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas para os valores de 3000 MPa e 6000 MPa. A percentagem volumétrica de betume no volume total foi considerada como sendo 9%. Relativamente ao parâmetro de fiabilidade, para o critério de deformação permanente, considerou-se uma sobrevivência de 95%.

Para terminar, calcularam-se os valores dos danos para cada solução, reajustando sempre que este valor ultrapassava os 80%, uma vez que se considerou que o valor ideal deveria rondar os 70 a 80%, como já foi referido. No Anexo B são apresentados os valores de dano obtidos para cada uma das hipóteses em estudo.

Finalmente, para cada solução descrita, fez-se variar a localização de uma geogrelha de reforço ao longo da profundidade da estrutura do pavimento. A Figura 3.2 ilustra as três localizações da geogrelha de reforço no pavimento, que foram consideradas na análise.

De modo a simplificar a análise de resultados, cada solução foi identificada com um código. A expressão (3.5) apresenta a estrutura de um código tipo.

$$i MD_j T_k F_l R_m \quad (3.5)$$

Onde: i – Tipo de pavimento (1, 2 ou 3)

MD_j – Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosa ($A = 3\,000\text{ MPa}$, $B = 4\,000\text{ MPa}$ ou $C = 6\,000\text{ MPa}$)

T_k – Classe de tráfego (5, 6 ou 7)

F_l – Classe de plataforma (1 ou 2)

R_m – Localização da geogrelha de reforço (0, 1, 2 ou 3)

Salienta-se que, para soluções com pavimentos do tipo 1, a geogrelha de reforço do tipo R₂ não foi considerada uma vez que este tipo de pavimento não apresenta a camada de sub-base.

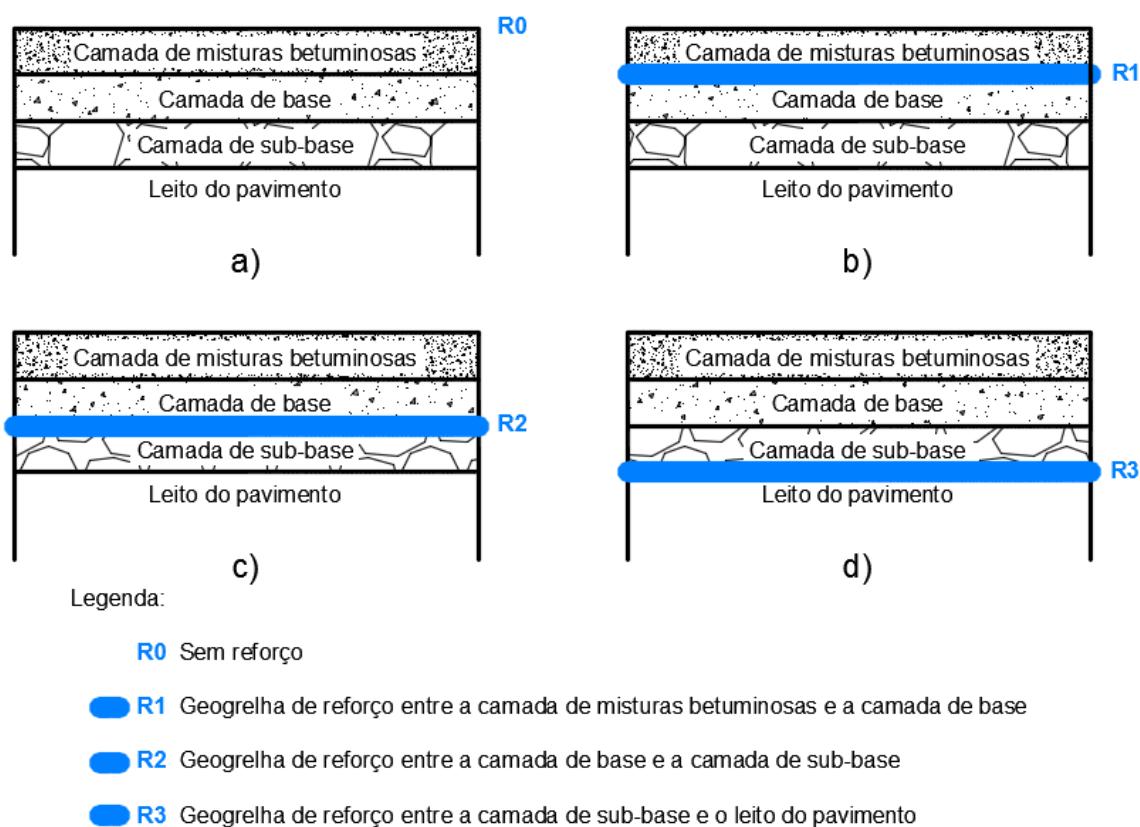


Figura 3.2: Localizações da geogrelha de reforço para cada uma das soluções em análise.

3.3. Características dos materiais

Relativamente ao comportamento dos materiais, considerou-se que apresentavam um comportamento elástico linear. As propriedades dos materiais considerados são semelhantes às assumidas no pré-dimensionamento da estrutura do pavimento. No entanto, como referido anteriormente, com o intuito de estudar mais casos da experiência em Portugal, nas soluções modeladas por elementos finitos fez-se variar o módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas para os valores de 3000 MPa (MD_A), 4000 MPa (MD_B) e 6000 MPa (MD_C). Os valores extremos representam uma aproximação calculada com base nas temperaturas de serviço máxima e mínima, respetivamente.

Para além disto, teve-se interesse em avaliar a diferença de resultados entre modelos considerados simplificadamente lineares e modelos não lineares. Para isso, teve-se como base o estudo elaborado por Saad et al (2006), e efetuou-se a análise de um modelo não linear, de uma das soluções, para o leito de pavimento considerando-se o modelo *CamClay*. Os valores utilizados na programação deste modelo apresentam-se no Quadro 3.4.

Quadro 3.4: Características do leito do pavimento para o modelo não linear CamClay.

E [MPa]	ν	M	Γ	k	λ	OCR
50,646	0,28	1,24	1,347	0,0024	0,014	1

Depois de várias modelações por elementos finitos elaboradas no âmbito do reforço de pavimentos rodoviários, Perkins S. W. (2001) apresentou uma revisão bibliográfica onde se demonstra que vários autores consideram o geossintético de reforço na modelação como material elástico linear isotrópico. Em causa estão estudos de Barksdale et al (1989), Burd e Houlsby (1986), Burd e Brocklehurst (1990), Dondi (1994) e Miura et al (1990).

A geogrelha foi modelada como camada delgada, tal como considerado por Bohagr (2013), alterando-se apenas as propriedades do material, consoante a rigidez ou o tipo de geossintético. No Quadro 3.5 é possível consultar as propriedades consideradas para os geossintéticos de reforço, bem como a espessura considerada na sua modelação.

Quadro 3.5: Propriedades dos geossintéticos de reforço considerados na modelação por elementos finitos.

Geossintético	Rigidez	e_G [m]	E [MPa]	ν
Geogrelha	Alta	$2,54 \times 10^{-3}$	4 230	0,35
	Média		1 970	
	Baixa		35	
Geotêxtil	Alta		3 150	
	Média		1 575	
	Baixa		42	
Referência		(Bohagr, 2013)	(Erickson e Drescher, 2001)	

3.4. Modelação numérica

3.4.1. Análise bidimensional

Tal como já referido anteriormente, existem disponíveis vários programas que permitem a modelação por elementos finitos e que foram já utilizados para este tipo de estudo. Para a formulação da análise, poderão considerar-se dois casos diferentes no que diz respeito à modelação de pavimentos: análise tridimensional ou bidimensional, podendo considerar-se para o último estado, plano de tensão ou estado axissimétrico. Cada formulação terá as suas vantagens e desvantagens, no que toca à modelação de pavimentos rodoviários. Os modelos tridimensionais têm uma formulação mais complexa e quando aplicados em pavimentos rodoviários, permitem vários tipos de solicitações, tais como carregamentos não simétricos ou mesmo carregamentos mais aproximados a rodados duplos.

Segundo Bohagr (2013) uma das desvantagens da consideração da análise bidimensional, é a forma como são representadas as ações de carga, uma vez que numa análise em estado plano de tensão a carga é modelada como uma linha, tal como pode ser visualizado na Figura 3.3.

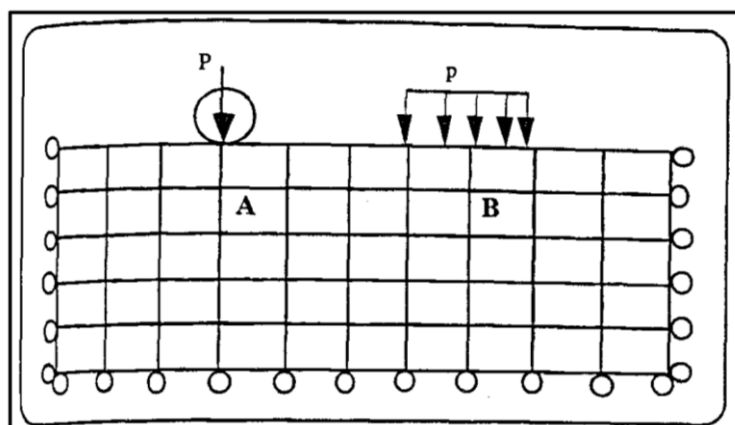


Figura 3.3: Representação da carga modelada para uma análise bidimensional em estado plano de tensão. (Bohagr, 2013)

Relativamente aos modelos axissimétricos, estes aproximam a carga aplicada a geometria circular, o que acaba por simplificar um problema tridimensional e analisá-lo a duas dimensões. Como se pode visualizar na Figura 3.4, este modelo poderá aplicar-se a estruturas de pavimentos com geometria simétrica relativamente a um eixo vertical de revolução. Deste modo, tornar-se-á sempre a carga aplicada em linha, em carga circular.

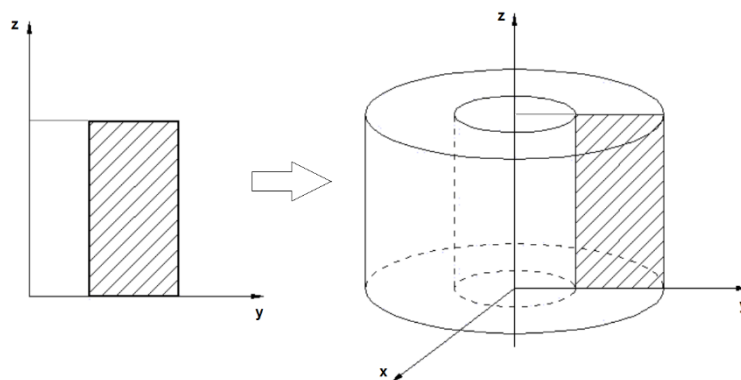


Figura 3.4: Modelo estrutural axissimétrico considerado no caso em estudo. (Adaptado de Stikan, 2006)

No presente estudo, optou-se por utilizar uma análise em 2D em estado axissimétrico, uma vez que representa uma aproximação adequada do que se pretende simular. Para tal, recorreu-se à utilização do programa ADINA, uma vez que este era um *software* de fácil utilização que reunia os requisitos necessários para a sua modelação.

De modo à adequada caracterização do carregamento aplicado nas várias soluções em análise considerou-se um eixo padrão de 80 kN.

No caso em estudo, uma vez que se tratou de uma análise de elementos finitos em 2D foi efetuada uma análise estática e foi necessário considerar algumas simplificações ao nível da carga. Deste modo, considerou-se que o carregamento era transmitido ao pavimento sob a ação de uma pressão de contacto de um único rodado, sendo o valor desta ação de 570 kPa, equivalente à aplicação de uma carga de 40 kN. Este valor, para a pressão de contacto, é referente a um eixo da *Shell*. Uma vez definida a carga, determinou-se qual o raio equivalente para a aplicação desta, recorrendo à equação (3.6).

$$PC = \frac{F}{A} \quad (3.6)$$

Onde: PC – Pressão de Contacto (kPa)

F – Carga aplicada (kN)

A – Área de aplicação da carga (m^2)

Assim, com base em (3.6), determinou-se o valor do raio de aplicação da pressão de contacto, $r = 0,15 m$. Na Figura 3.5 é possível observar a configuração definida na programação do modelo 2D por elementos finitos.

3.4.2. Geometria e condições de fronteira

A Figura 3.5 mostra as dimensões utilizadas no modelo em estudo, que tiveram como base as medidas adotadas no artigo formulado por Saad et al (2006) em 3D e na dissertação formulada por Bohagr, (2013) em 2D. Os parâmetros a , b e c variam consoante as soluções que foram consideradas tendo em conta a experiência portuguesa.

Relativamente às condições de fronteira foram consideradas as seguintes condições cinemáticas convencionais:

- Nas duas arestas verticais considerou-se encastramento deslizante com liberdade de movimentos verticais segundo o eixo z e bloqueio dos movimentos segundo os eixos x e y ;
- Na face horizontal inferior do sólido, considerou-se um encastramento, ou seja, bloqueio dos movimentos nas três direções.

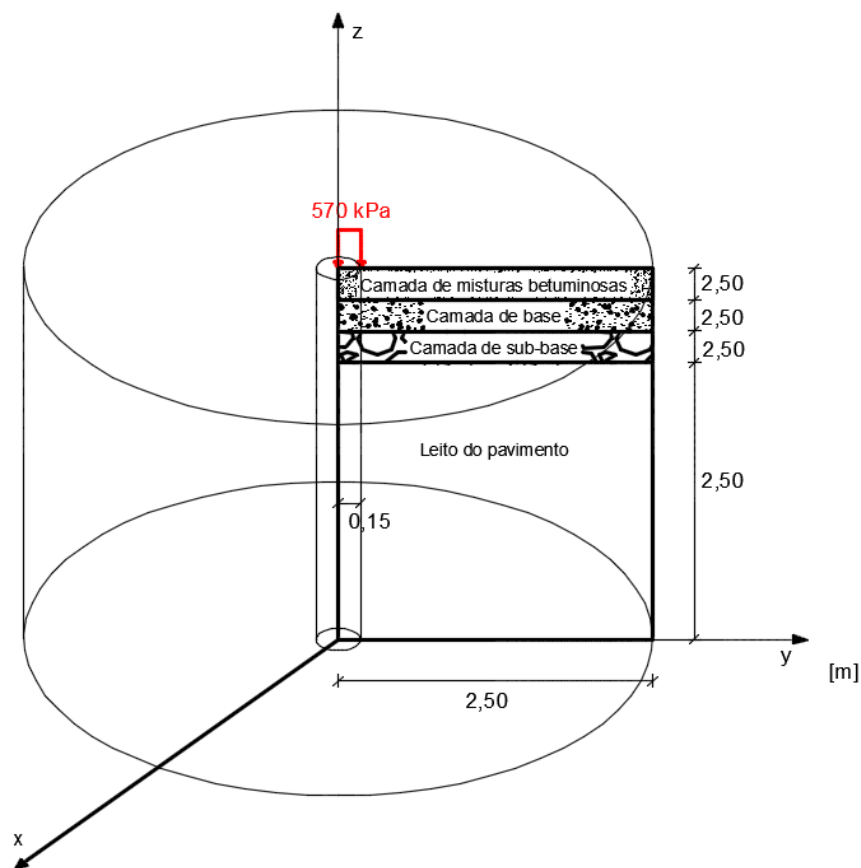


Figura 3.5: Geometria do modelo em 2D por elementos finitos em estado de axissimetria.

3.4.3. Propriedades da malha de elementos finitos

Para a modelação dos pavimentos em questão, foi necessário criar malhas de elementos finitos. Para tal, teve-se em conta a sua divisão em partes consideráveis, para obter uma maior precisão dos dados resultantes da modelação, uma vez que os valores nos nós resultam da média de valores que se avizinham. Por outro lado, também não foi considerada uma malha exageradamente dividida, para conseguir elaborar uma análise em tempo útil, sem excessivos dados para tratar. Decidiu-se então optar pela divisão de cada sólido, correspondendo cada sólido a uma camada, em 80 partes.

Considerou-se também a hipótese de dividir por um maior valor, os sólidos com maior dimensão, mas concluiu-se que tal não influenciava negativamente as hipóteses e apenas tornava o modelo mais complexo. Por outro lado, com a divisão formulada, as áreas em análise apresentavam a precisão adequada.

No programa *ADINA*, para a formulação das camadas do pavimento e a camada representativa do geossintético, foram definidos grupos de elementos consoante a camada, modelados como sólidos em 2D de 8-nós.

Cada um dos sólidos formados foi então modelado com a mesma quantidade de nós, num total de 6561 nós por sólido. Na Figura 3.6 é possível observar um exemplo, correspondente a uma das

soluções efetuadas da malha de elementos finitos formada no modelo. Nas zonas onde a malha é bastante reduzida, o padrão fica homogéneo.

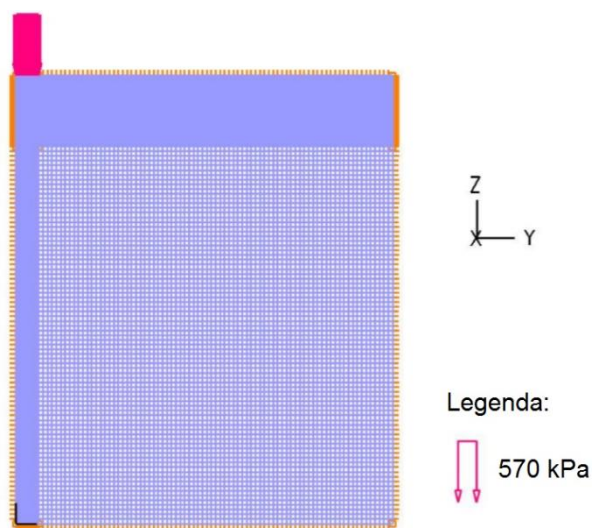


Figura 3.6: Malha de elementos finitos considerada para a solução $2 MD_A T_5 F_1 R_0$.

3.4.4. Características do modelo e suas limitações

O modelo, tal como referido anteriormente, tem como base as estruturas do pavimento dimensionadas em Portugal. Este facto permite que este seja um estudo único e distinto daquilo que existe atualmente em variados artigos de simulação por elementos finitos. É ainda possível analisar um modelo em três dimensões, uma vez que se considera um estado de tensão assimétrica. Ao considerar este estado, o modelo aproxima-se significativamente dos pressupostos usadas no método da Shell, que considera a carga de contacto como sendo circular.

Em relação às limitações, foram executadas variadas simplificações, como seja o facto de se terem considerado todos os materiais como elásticos lineares ou o facto de se assumir no modelo uma perfeita aderência na interface entre o geossintético de reforço e o material subjacente, o que em ambiente real poderia não acontecer.

3.5. Calibração do modelo

Para garantir a confiança nos resultados obtidos por elementos finitos com o programa *ADINA*, foram realizados alguns ensaios nas condições de linearidade propostas anteriormente. Deste modo, realizou-se uma análise comparativa entre os valores das extensões obtidas com o *software BISAR* e os valores obtidos, para os mesmos casos, com o *software ADINA*. Para o efeito, recorreu-se a uma das formulações realizadas na dissertação de Bohagr (2013) e a um exemplo concreto dos modelos que serão posteriormente analisados.

Para que esta calibração fizesse sentido, foram consideradas três formulações. Em primeiro lugar, obtiveram-se os valores das extensões e do assentamento vertical, com recurso ao *software BISAR*.

Estes valores foram obtidos para as mesmas condições do pré-dimensionamento efetuado anteriormente, ou seja, com a aplicação de duas forças verticais de 20 kN cada, representativas do modelo de eixo padrão formulado pela Shell. Em segundo lugar, configurou-se o mesmo programa, de modo a estar em conformidade com a pressão de contacto que é aplicada sobre o pavimento no programa *ADINA*, representativa do eixo padrão formulado pela Shell. Para tal, definiu-se um modo de carga que aplica uma pressão de contacto de 570 kPa, bem como uma força vertical de 40 kN, calculando automaticamente um raio de aplicação da carga total de 0,15 m. Finalmente, obtiveram-se as extensões para as mesmas condições no *software ADINA*. Neste caso, foram considerados os mesmos parâmetros, mas mediante diferentes configurações. Definiu-se a mesma pressão de contacto, mas aplicada com uma largura correspondente ao raio mencionado anteriormente.

Em seguida, apresentam-se os vários casos considerados na validação do modelo em causa, tendo em conta diferentes parâmetros, de modo a validar os resultados obtidos em diferentes condições de análise.

No primeiro caso em análise, utilizaram-se as propriedades consideradas, numa das soluções de Bohagr (2013). Na Figura 3.7 e no Quadro 3.6 são apresentadas as propriedades e espessuras, bem como os resultados obtidos para a validação deste caso respetivamente. Esta solução apresenta uma espessura fina para a camada de misturas betuminosas e baixos módulos de deformabilidade para a camada de base e o leito do pavimento.

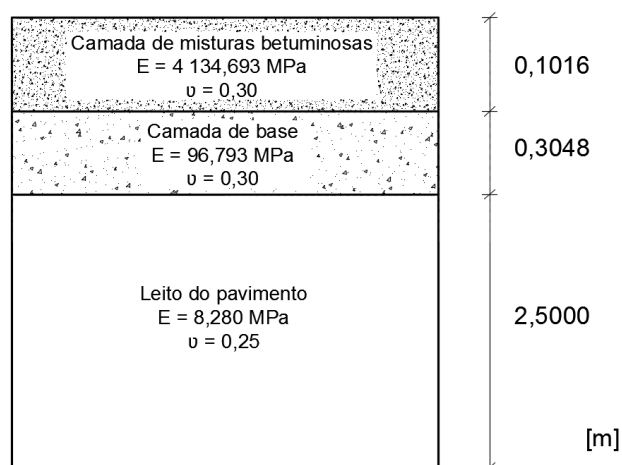


Figura 3.7: Propriedades dos materiais do primeiro caso considerado para a calibração do modelo.

Quadro 3.6: Resultados correspondentes ao primeiro caso considerado para a calibração do modelo.

	<i>BISAR</i> : 2 cargas de 20 kN	<i>BISAR</i> : Pressão de contacto	<i>ADINA</i> : Pressão de contacto
$\varepsilon_c (\times 10^{-6})$	-1917,0	-2077,0	-2007,0
$\varepsilon_t (\times 10^{-6})$	360,2	407,4	404,4
Assentamento vertical máximo à superfície [m]	$-2,169 \times 10^{-3(*)}$	$-2,269 \times 10^{-3}$	$-1,768 \times 10^{-3}$

(*) Medido no centro, entre as duas cargas de 20 kN

Nos quadros apresentados os valores de extensão positivos e negativos correspondem a trações e compressões, respetivamente. Relativamente a assentamentos verticais, estes são negativos, de acordo com o eixo representado na Figura 3.5.

Verificou-se que os valores obtidos para as extensões eram bastante semelhantes, apesar de que quando calculado com a aplicação de duas cargas de 20 kN haver ligeiras diferenças, tal como expectável. Os valores para o assentamento vertical máximo à superfície foram os que apresentaram uma maior discrepância, sendo que o valor mais baixo verificou-se na simulação efetuada pelo *software ADINA*.

No segundo caso, optou-se por ter como base o caso anterior, mas com a máxima espessura que é aplicada nas soluções em estudo neste trabalho. Na Figura 3.8 e no Quadro 3.7 é possível observar as propriedades, espessuras e resultados obtidos para a segunda simulação para validação do modelo.

Neste segundo caso, os valores apresentaram maior divergência entre si, comparativamente ao primeiro caso, face ao aumento da camada de misturas betuminosas. Mesmo assim, considera-se que são suficientemente semelhantes para validar o modelo em estudo.

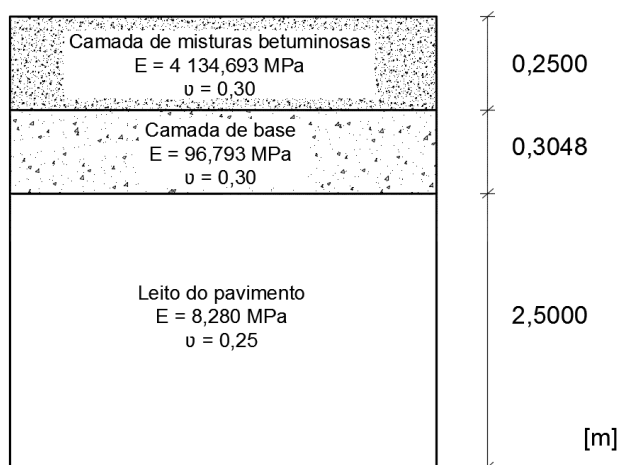


Figura 3.8: Propriedades dos materiais do segundo caso considerado para a calibração do modelo.

Quadro 3.7: Resultados correspondentes ao segundo caso considerado para a calibração do modelo.

	BISAR: 2 cargas de 20 kN	BISAR: Pressão de contacto	ADINA: Pressão de contacto
$\varepsilon_c (\times 10^{-6})$	-6259,0	-6483,0	-6365,0
$\varepsilon_t (\times 10^{-6})$	132,2	142,7	132,1
Assentamento vertical máximo à superfície [m]	$1,231 \times 10^{-3}(*1)$	$1,258 \times 10^{-3}$	$8,687 \times 10^{-3}$

(*1) Medido no ponto de aplicação de uma carga de 20 kN

Finalmente, na Figura 3.9 e no Quadro 3.8 apresentam-se os mesmos valores para o terceiro caso. Este representa uma das hipóteses formulada para pavimentos em Portugal e foi escolhida apenas para validação dos resultados obtidos com o programa *ADINA*, por comparação com os resultados obtidos com o outro programa.

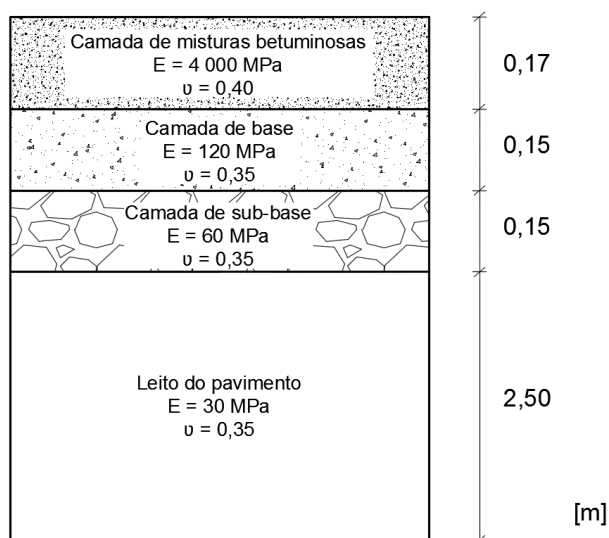


Figura 3.9: Propriedades dos materiais do terceiro caso considerado para a calibração do modelo.

Quadro 3.8: Resultados correspondentes ao terceiro caso considerado para a calibração do modelo.

	<i>BISAR</i> : 2 cargas de 20 kN	<i>BISAR</i> : Pressão de contacto	<i>ADINA</i> : Pressão de contacto
$\varepsilon_c (\times 10^{-6})$	-556,7	-596,0	-575,0
$\varepsilon_t (\times 10^{-6})$	185,8	207,7	205,0
Assentamento vertical máximo à superfície [m]	$7,270 \times 10^{-4(*)}$	$7,670 \times 10^{-4}$	$5,870 \times 10^{-4}$

(*) Medido no centro, entre as duas cargas de 20 kN

Este terceiro caso faz referência a um pavimento do tipo 2, com classe de plataforma do tipo F_1 e apresenta uma classe de tráfego T_7 . Neste exemplo, os valores das extensões de tração para a pressão de contacto deram bastante similares entre si, enquanto que para as extensões de compressão a diferença foi maior. Relativamente ao assentamento vertical, quando este é simulado pelo *software ADINA*, o seu valor é para os três casos, inferior.

3.6. Estudo do efeito da localização do geossintético

Os principais fatores utilizados para a avaliação do estado de degradação de um pavimento são a fadiga e a deformação permanente. Tal como visto anteriormente, para o cálculo da eficiência de um geossintético de reforço é utilizado o TBR que traduz a relação entre o número passagens do eixo padrão num pavimento reforçado e o número de passagens do eixo padrão num pavimento não reforçado, com a mesma simetria e materiais constituintes. Neste contexto, são calculadas as

extensões de tração e de compressão para o cálculo do número de ciclos que o pavimento suporta com e sem geogrelha de reforço, de modo a obter o valor deste rácio para uma avaliação do impacto do geossintético no pavimento. Para cada caso, o valor de TBR superior a 1,0 significa que ocorreu benefício na aplicação da geogrelha, ou seja, aumentou-se o número de passagens do eixo padrão que o pavimento suporta.

Com uma perspetiva de benefício económico, no que toca aos custos iniciais de obra, surgiu uma perspetiva diferente do que até agora foi analisado. Assim, no âmbito desta dissertação foi desenvolvido um índice que pretende ter um objetivo semelhante ao BCR, já mencionado anteriormente. No entanto, neste caso o índice teve o objetivo de analisar a redução da espessura da camada de misturas betuminosas, uma vez que esta é aquela que maior custo terá na totalidade do pavimento. Deste modo, este índice traduziu o valor da redução da espessura da camada de misturas betuminosas, para o qual um pavimento com a geogrelha de reforço suporte a mesma quantidade de tráfego dimensionado. Este índice é descrito como BLR (Bituminous Layer Reduction – Redução da espessura da camada de misturas betuminosas) e calculado pela expressão (3.7).

$$BLR = \frac{e_R}{e_U} \quad (3.7)$$

Onde: *BLR* - Bituminous Layer Reduction (Redução da espessura da camada de misturas betuminosas)

e_R – Espessura da camada de misturas betuminosas com geogrelha de reforço

e_U – Espessura da camada de misturas betuminosas sem geogrelha de reforço

Para além dos critérios mencionados, obteve-se também os valores correspondentes às deformações na superfície do pavimento, com e sem geossintético de reforço. De modo a analisar este parâmetro, foi desenvolvido um outro índice que tem como objetivo perceber a redução da deformação sentida na superfície do pavimento. Para isso, o índice relaciona a deformação sentida com geossintético de reforço com a deformação sentida sem este. Este índice é descrito por SDR (Superficial Displacement Reduction – Redução da deformação superficial) e é calculado pela expressão (3.8).

$$SDR = \frac{d_R}{d_U} \quad (3.8)$$

Onde: *SDR* – Superficial Displacement Reduction (Redução da deformação superficial)

d_R – Deformação sentida na superfície do pavimento com geossintético de reforço

d_U – Deformação sentida na superfície do pavimento sem reforço

Pretende-se, deste modo, determinar os valores das extensões e deformações no pavimento com aplicação de uma geogrelha de reforço, para poder calcular o número de passagens do eixo padrão e os índices mencionados anteriormente. Assim, para cada estrutura dimensionada são avaliados todos estes índices, quando se aplica reforço a diferentes profundidades da estrutura do pavimento.

Neste estudo paramétrico simplificadaamente consideraram-se todos os materiais como sendo elásticos lineares e apenas a geogrelha com rigidez alta, uma vez que se visa a compreensão do comportamento do pavimento face à aplicação do geossintético a vários níveis da sua estrutura, e também, a avaliação do benefício deste material, quando aplicado sob diferentes condições de tráfego, espessuras das camadas e propriedades dos materiais.

3.7. Estudo do efeito do tipo de geossintético

Numa segunda análise, em função das conclusões obtidas no estudo paramétrico sobre o efeito da localização do reforço no dimensionamento, pretende-se compreender melhor o efeito da rigidez do geossintético no reforço de pavimentos rodoviários. Para isso, são considerados geossintéticos com diferentes propriedades, a nível do seu módulo de deformabilidade, alterando na prática a rigidez do material. Para tal, são consideradas duas geogrelhas com menor rigidez que a considerada no estudo inicial, para comparação dos resultados obtidos e é também considerado um geotêxtil para, de igual modo, perceber a diferença entre dois tipos de geossintéticos e também qual o mais eficiente para a função requerida.

Os parâmetros considerados para a elaboração destas soluções encontram-se presentes nos subcapítulos referentes à conceção das estruturas do pavimento e características dos materiais.

3.8. Análise da influência da modelação da fundação

No estudo inicial foram assumidas simplificações relativamente aos modelos considerados para cada camada da estrutura do pavimento, dada a quantidade de soluções que se pretendiam estudar. Deste modo, foi também elaborado um estudo paramétrico referente à consideração de um modelo não linear para a camada de leito do pavimento. Esta análise foi abordada com o intuito de avaliar os resultados obtidos com ambos os modelos, linear e não linear, para de um modo geral perceber se ocorrem alterações significativas ao utilizar estes modelos.

Este estudo apenas foi executado para a solução com classe de fundação F_2 , uma vez que o valor do módulo de deformabilidade considerado no leito do pavimento se aproximava do valor considerado no estudo semelhante elaborado por Saad et al (2006), para um modelo não linear. Foi utilizado o pavimento tipo 2, uma camada de mistura betuminosas com módulo de deformabilidade A e fez-se variar dois tipos de tráfego, T_5 e T_7 .

Os parâmetros considerados para a elaboração destas soluções encontram-se presentes nos subcapítulos referentes à conceção das estruturas do pavimento e características dos materiais.

3.9. Considerações finais

Todos os índices mencionados anteriormente foram calculados e analisados para perceber o impacto da aplicação de geossintéticos na estrutura do pavimento. Assim, foi efetuado um estudo do desempenho deste material sob diversas condições, sendo apenas uma análise da viabilidade técnica deste. É de salientar que existem outras vertentes a ser consideradas de modo a considerar o geossintético viável em cada caso.

Depois de exposto o modelo de análise de resultados e as considerações efetuadas na programação do modelo em estudo, passou-se para a simulação das soluções. Todos os valores retirados das iterações efetuadas no programa ADINA são apresentadas em anexo, como mencionado adiante.

4. Resultados e Discussão

4.1. Considerações iniciais

Para a análise dos resultados obtidos na modelação por elementos finitos foram considerados três critérios de degradação: fadiga na camada de misturas betuminosas, deformação permanente no leito do pavimento e deformações à superfície do pavimento. Sabendo que um dos fatores que maior contributo apresenta para a variação destes critérios é a magnitude das extensões e deformações, obtiveram-se os valores correspondentes das extensões horizontais de tração e verticais de compressão e os valores das deformações horizontais e verticais. Na Figura 4.1 apresenta-se o local onde foram medidos os parâmetros mencionados para os três critérios.

Os valores retirados do ADINA, bem como todos os valores calculados a partir destes, apresentam-se no Anexo C, tanto para o critério de fadiga como para o critério de deformação permanente.

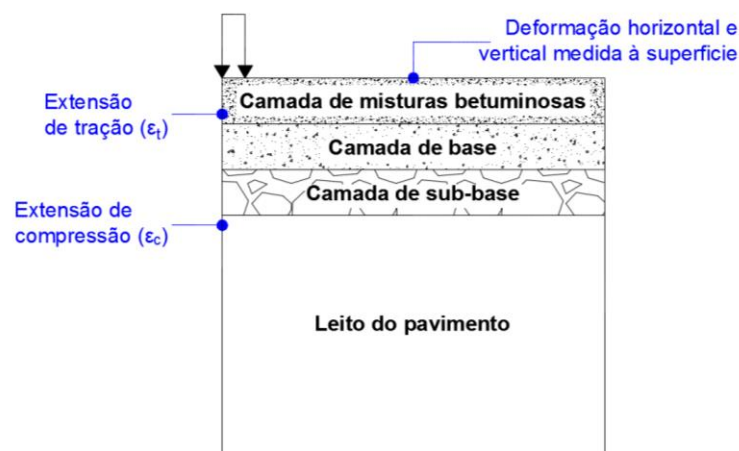
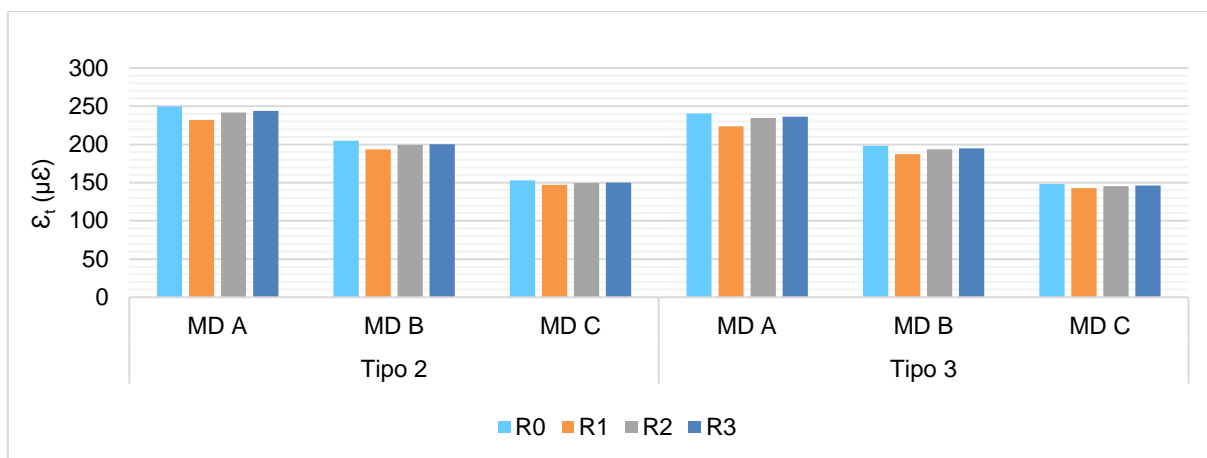


Figura 4.1: Localização dos pontos onde foram efetuadas as medições das extensões e deformações.

4.2. Critérios de análise

De modo a estudar o efeito da aplicação de uma geogrelha, tal como mencionado anteriormente, foram compostas várias estruturas, onde se fez alterar tanto as propriedades das camadas do pavimento como as suas espessuras. Para uma análise deste comportamento, foram consideradas as extensões iniciais num modelo sem qualquer tipo de reforço, de modo a ter um método de comparação dos resultados posteriores.

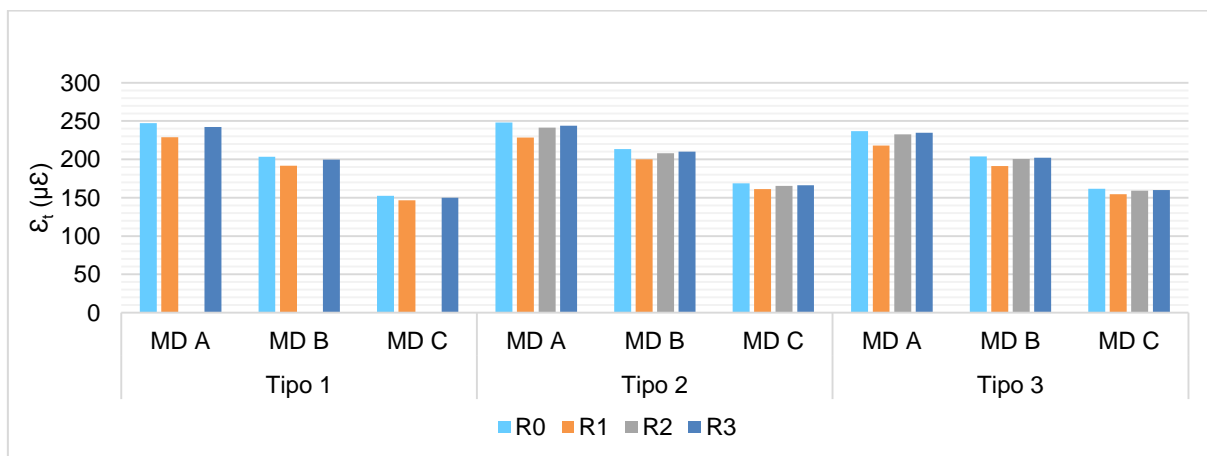
Assim, ao posicionar uma geogrelha a várias profundidades do pavimento, foi possível avaliar o impacto das extensões ao longo da estrutura do pavimento. Na Figura 4.2 e na Figura 4.3 é possível visualizar as variações dos valores obtidos para as extensões de tração, para as classes de plataforma F_1 e F_2 , respetivamente.



Legenda:

- MD A - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 3 000 MPa
- MD B - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 4 000 MPa
- MD C - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 6 000 MPa
- R0 - Pavimento sem reforço
- R1 - Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base
- R2 - Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base
- R3 - Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento

Figura 4.2: Comparação entre os valores das extensões de tração para as várias localizações do geossintético, para classe de plataforma F_1 e classe de tráfego T_7 .



Legenda:

- MD A - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 3 000 MPa
- MD B - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 4 000 MPa
- MD C - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 6 000 MPa
- R0 - Pavimento sem reforço
- R1 - Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base
- R2 - Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base
- R3 - Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento

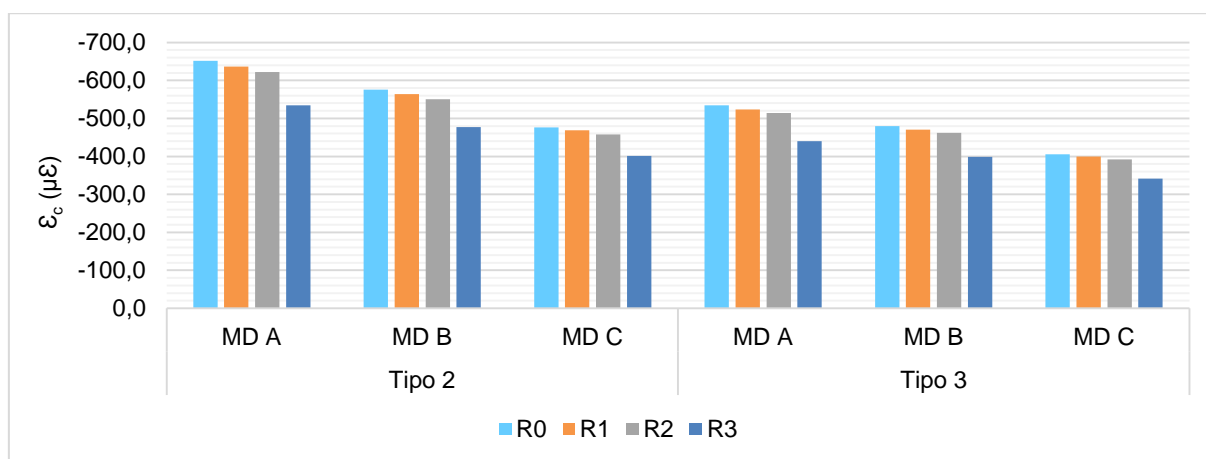
Figura 4.3: Comparação entre os valores das extensões de tração para as várias localizações do geossintético, para classe de plataforma F_2 e classe de tráfego T_7 .

Depois de analisar os gráficos referentes às extensões, é de notar que as variações das extensões horizontais não são tão elevadas como aquilo que seria de esperar. Mesmo assim, verifica-se que para todos os tipos de pavimento, variando o módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas, ocorre sempre redução, mesmo sendo bastante ligeira em alguns casos. É também de notar que quando a geogrelha se localiza na posição R₁, ou seja, entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base, ocorre em todos os casos uma melhoria mais expressiva em comparação com as restantes localizações para a geogrelha.

Para além disto, e ainda referente à Figura 4.2 e à Figura 4.3, observa-se que à medida que a espessura da camada de base aumenta, as extensões, tanto no critério de fadiga como no critério de deformação permanente, apresentam uma redução.

De seguida foi elaborada uma análise semelhante para a variação das extensões de compressão. Na Figura 4.4 e na Figura 4.5 podem ser observados os valores que foram obtidos para estas extensões, também para as classes de plataforma F₁ e F₂, respetivamente.

Tal como é possível observar, assim como para as extensões de tração, também para as extensões de compressão em todos os casos ocorre uma melhoria. É possível notar que, para a extensão medida no topo da camada de leito do pavimento, as diferenças com e sem reforço, são um pouco mais evidentes, especialmente para o caso em que a geogrelha está na posição R₃, ao contrário daquilo que tinha sido visto para a extensão ortogonal.



Legenda:

MD A - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 3 000 MPa

MD B - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 4 000 MPa

MD C - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 6 000 MPa

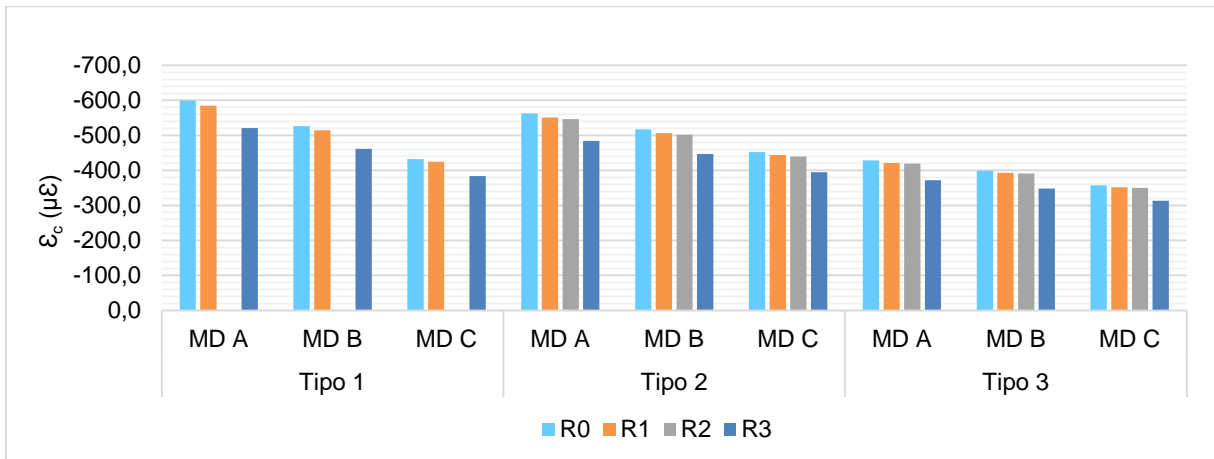
R0 - Pavimento sem reforço

R1 - Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base

R2 - Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base

R3 - Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento

Figura 4.4: Comparação entre os valores das extensões de compressão para as várias localizações do geossintético, para classe de plataforma F₁ e classe de tráfego T₇.



Legenda:

MD A - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 3 000 MPa

MD B - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 4 000 MPa

MD C - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 6 000 MPa

R0 - Pavimento sem reforço

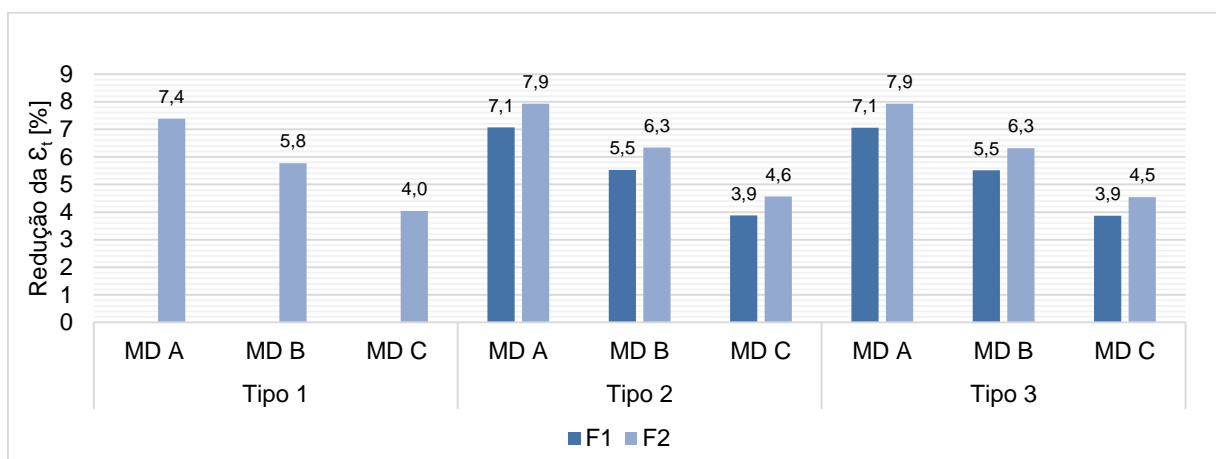
R1 - Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base

R2 - Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base

R3 - Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento

Figura 4.5: Comparação entre os valores das extensões de compressão para as várias localizações do geossintético, para classe de plataforma F_2 e classe de tráfego T_7 .

Como expectável, as extensões, tanto verticais como horizontais, apresentam sempre valores superiores quando se está em presença de solos com características mais fracas. De seguida apresenta-se na Figura 4.6 e na Figura 4.7 as percentagens de redução para cada uma das extensões horizontal e vertical respetivamente, de modo a ter uma ideia mais clara da sua variação consoante as características dos materiais. Os valores utilizados para o cálculo das percentagens de redução de cada uma das extensões, dizem respeito à posição da geogrelha, que em cada caso apresentou maior benefício na sua aplicação.



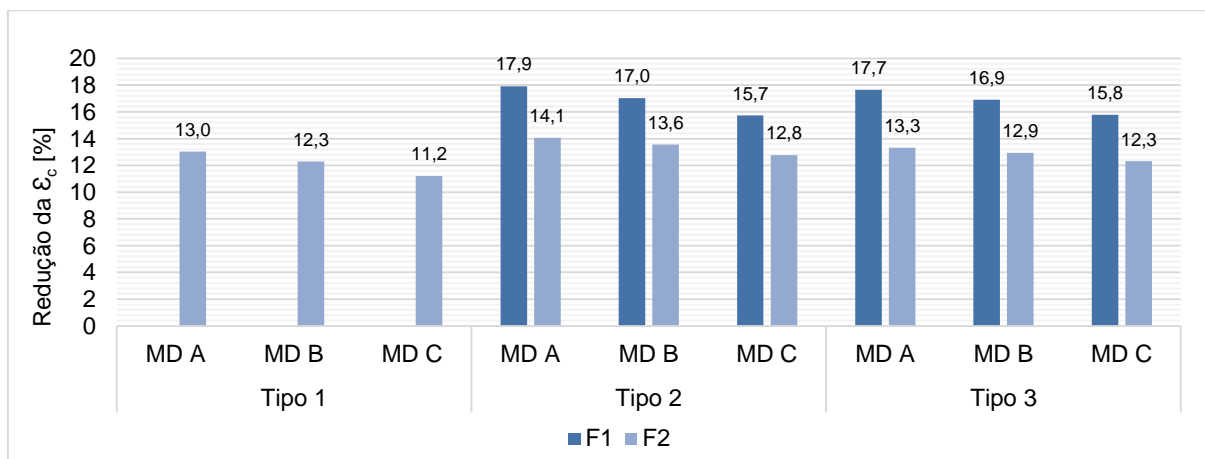
Legenda:

MD A - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 3 000 MPa

MD B - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 4 000 MPa

MD C - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 6 000 MPa

Figura 4.6: Percentagem da redução da extensão de tração para posição R_1 e classe de tráfego T_7 .



Legenda:

MD A - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 3 000 MPa

MD B - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 4 000 MPa

MD C - Módulo de deformabilidade da camada de misturas betuminosas de 6 000 MPa

Figura 4.7: Percentagem da redução da extensão de compressão para posição R_3 e classe de tráfego T_7 .

Da comparação das duas figuras, conclui-se que claramente ocorre uma redução mais pronunciada nas extensões de compressão, chegando a atingir o valor máximo de redução de aproximadamente 18%, enquanto que o máximo valor de redução das extensões de tração, apresenta o valor de aproximadamente 8%. Verifica-se também que há diferenças na obtenção das máximas reduções de extensão ao nível da qualidade dos materiais, ou seja, para os valores da extensão de tração, há maior percentagem de redução em pavimentos com classe de plataforma F_2 enquanto que para os valores da redução das extensões de compressão, verifica-se que quando está presente uma fundação F_1 , maior será o contributo da geogrelha.

A isto acresce, como expectável, que em ambos os gráficos haja uma influência das propriedades da camada de misturas betuminosas, ou seja, verifica-se que quanto maior é o módulo de deformabilidade, menor é o impacto da geogrelha no pavimento.

Uma vez analisado o comportamento das extensões, face à aplicação de um geossintético, apresenta-se de seguida na Figura 4.8 e na Figura 4.9, a variação de cada uma das extensões ao longo da estrutura do pavimento modelado. Estas imagens foram retiradas das simulações modeladas no programa ADINA e são referentes à hipótese $2 MD_A T_7 F_2$ para a variação das extensões de tração e $2 MD_A T_7 F_1$ para a variação das extensões de compressão.

Da Figura 4.8 é de notar que, como já visto anteriormente, as reduções da extensão de tração quando se aplica uma geogrelha não têm muita expressão. O valor calculado para a redução nesta extensão é de apenas aproximadamente 8%, não apresentando qualquer impacto naquilo que é visualizado. Para a solução $2 MD_A T_7 F_1$, por observação da imagem correspondente, são visíveis algumas alterações no que diz respeito à intensidade da extensão vertical quando é aplicado o reforço. Assim, é visualizada uma pequena alteração, correspondente a uma redução da extensão de aproximadamente 18%, sob o ponto de aplicação da carga. Tal facto, prova que com a aplicação

deste material, é possível ao pavimento suportar um maior nível de carga para a mesma deformação inicial, sem geogrelha.

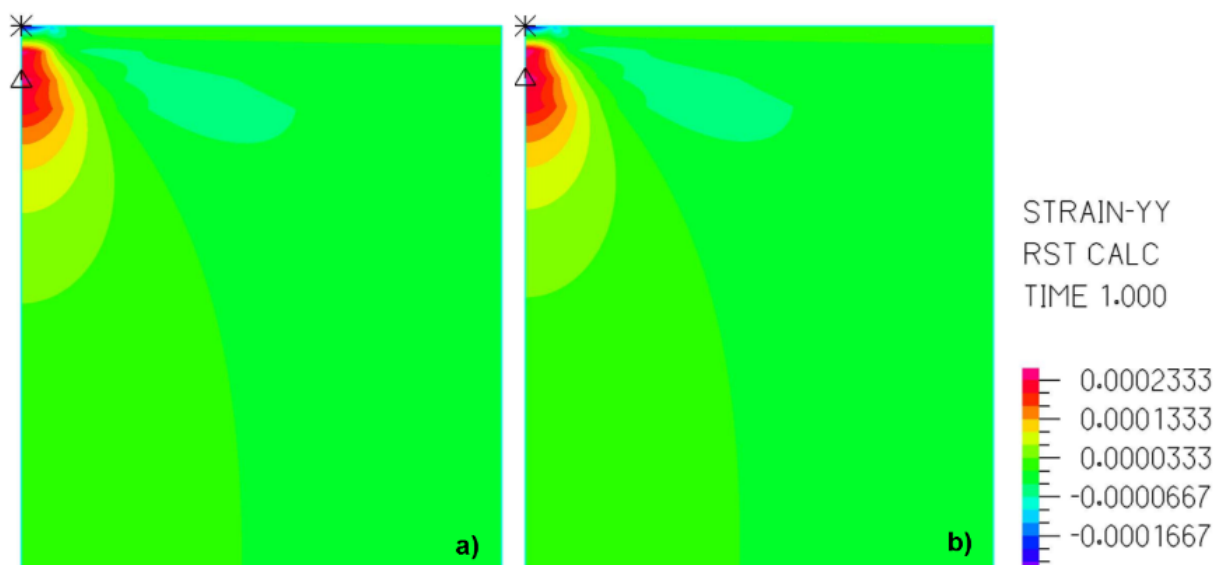


Figura 4.8: Variação da extensão de tração da solução $2 MD_A T_7 F_2$ ao longo de todo o pavimento: a) sem reforço, R_0 ; e b) com geogrelha de reforço, R_1 .

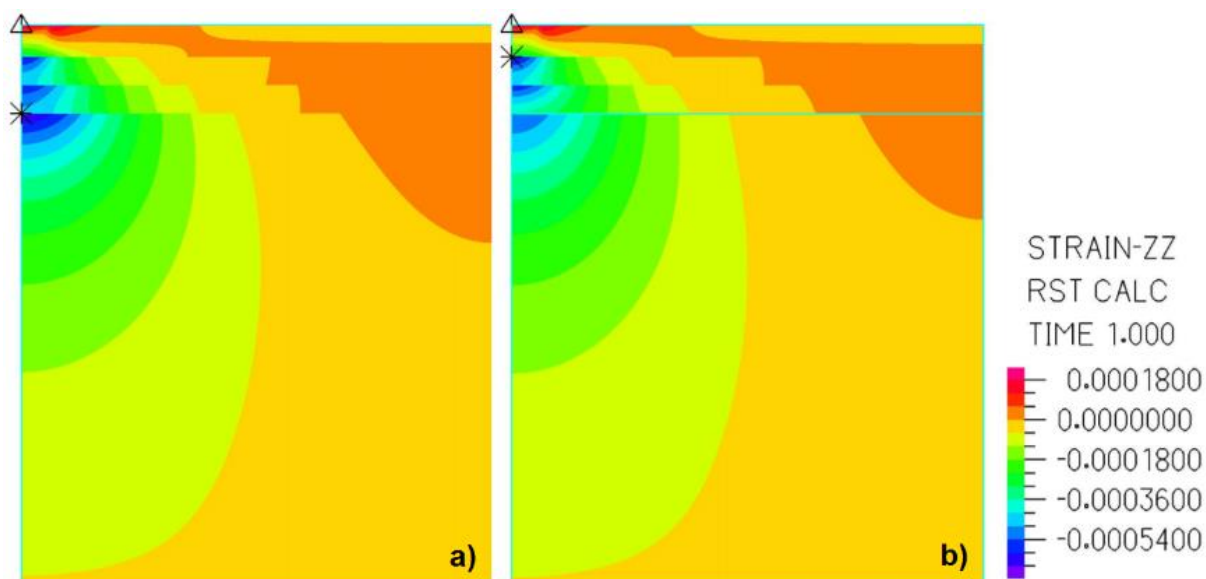


Figura 4.9: Variação da extensão de compressão da solução $2 MD_A T_7 F_1$ ao longo de todo o pavimento: a) sem reforço, R_0 ; e b) com geogrelha de reforço, R_3 .

É ainda de referir que, tanto no artigo de Saad et al (2006) como na tese de Bohagr (2013), os parâmetros medidos correspondem aos máximos para cada situação e, como tal, ocorrem diferenças como é o caso da variação da extensão horizontal ao longo do pavimento. Na Figura 4.8 apresenta-se o comportamento da extensão de tração, quando é aplicada uma geogrelha entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base, que apresenta o seu valor máximo quando a geogrelha é colocada nesta posição. Contudo, ao analisar a extensão horizontal ao longo da estrutura do pavimento, é de verificar que se se colocar a geogrelha na posição R_3 , ocorre um visível impacto por parte desta, tal como é possível observar na Figura 4.10.

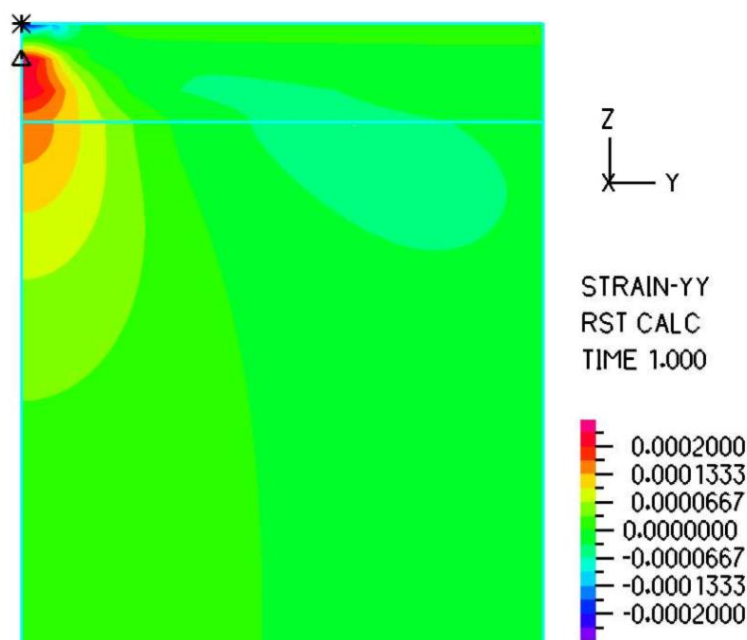


Figura 4.10: Variação da extensão de tração da solução 2 $MD_A T_7 F_2 R_3$ ao longo de todo o pavimento.

4.3. Efeito do reforço no tráfego admissível

Como já foi mencionado no início deste trabalho, um dos parâmetros mais utilizados para averiguar o impacto dos geossintéticos de reforço é o cálculo do TBR. Este parâmetro é medido em função da comparação do tráfego admissível num pavimento sem qualquer reforço e do tráfego num pavimento com um geossintético de reforço e traduz a eficiência crítica da aplicação do geossintético em causa. Na Figura 4.11 e na Figura 4.12 são apresentados os gráficos que mostram este índice, tanto para o critério de fadiga, como para o critério de deformação permanente respetivamente.

Para esta análise, é apresentada uma solução referente ao pavimento do tipo 2, com uma classe de plataforma F_1 . Verifica-se que, para os dois casos, os valores do TBR tendem para uma curva de síntese logarítmica. Note-se que, qualquer que seja a posição da geogrelha, o valor do TBR para ambos os critérios é sempre superior a 1, o que significa que este material quando aplicado, é sempre benéfico, podendo, no entanto nalguns casos, não se justificar. Quando se analisa pelo critério de fadiga, é de notar que os valores obtidos, correspondentes ao TBR, são menos acentuados. Verifica-se também que ocorre um maior impacto quando colocada a geogrelha sob a camada de misturas betuminosas, R_1 . Na Figura 4.12 ao analisar o critério de deformação permanente, confirmou-se uma vez mais que quando se aplica a geogrelha no topo do leito do pavimento obtém-se uma maior vantagem no que toca ao aumento do número de passagens do eixo padrão.

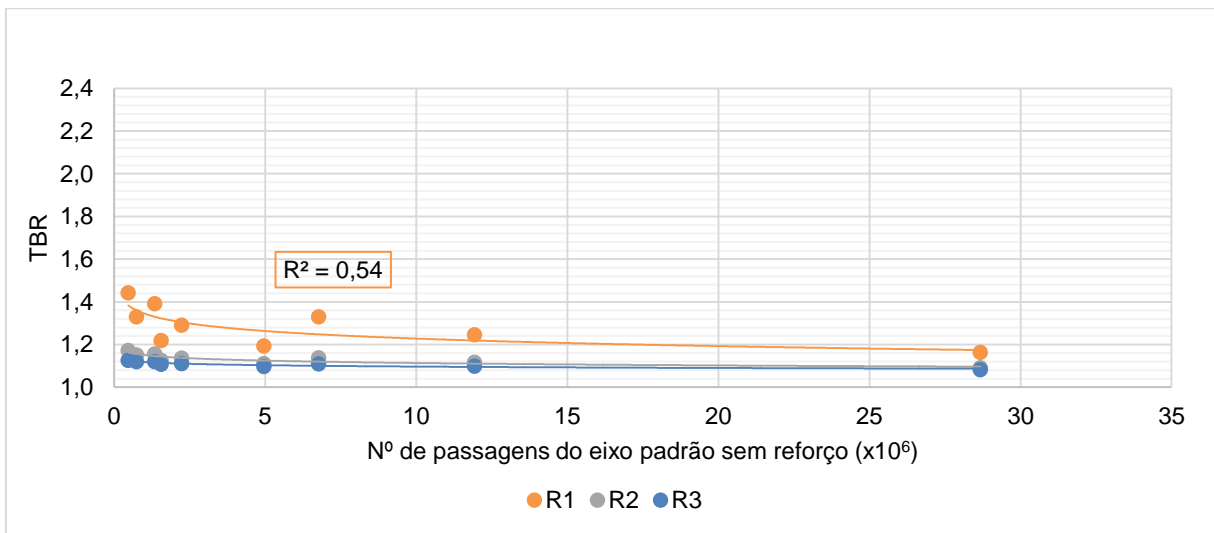


Figura 4.11: Número de passagens do eixo padrão em função do TBR para o critério de fadiga para pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1 .

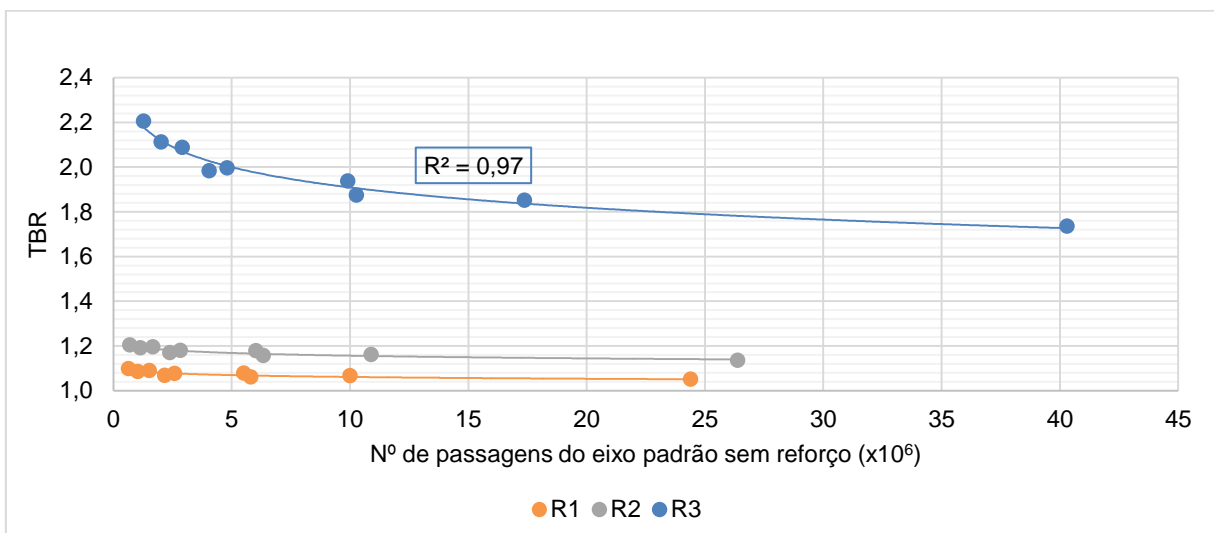


Figura 4.12: Número de passagens do eixo padrão em função do TBR para o critério de deformação permanente para pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1 .

Para além disto, verifica-se que os valores de TBR são superiores em pavimentos com menor tráfego, ou seja, quanto menor a espessura da camada de misturas betuminosas, maior é o impacto causado pela aplicação da geogrelha de reforço. No Quadro 4.1 podem ser observados os resultados obtidos do cálculo das percentagens do aumento obtido para o nº de passagens do eixo padrão com a aplicação de uma geogrelha.

Verifica-se, pois, que para a deformação permanente ocorre um aumento considerável do número de passagens do eixo padrão, verificando-se um aumento que compreende valores entre os 33 e os 55%. Já para o critério de fadiga, registam-se valores que estão contidos no intervalo de 14 e 34%. Os valores máximos observados correspondem, no caso do critério de fadiga a ambientes em que os materiais são de melhor qualidade, enquanto que, se se analisar o critério de deformação permanente, os máximos valores observados dizem respeito aos materiais constituintes da estrutura do pavimento de pior qualidade.

Quadro 4.1: Percentagem do aumento do número de passagens do eixo padrão quando se aplica uma geogrelha de reforço.

			Aumento do N ^o de passagens do eixo padrão ao aplicar reforço [%]					
			Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
			CF ^(*)	CDP ^(*)	F ^(*)	CDP ^(*)	CF ^(*)	CDP ^(*)
F ₁	MD _A	T ₅	-	-	24,8	48,4	26,0	49,4
		T ₆	-	-	28,1	52,1	28,9	52,4
		T ₇	-	-	30,7	54,6	30,6	54,0
	MD _B	T ₅	-	-	19,7	46,0	20,7	47,3
		T ₆	-	-	22,5	49,9	23,2	50,6
		T ₇	-	-	24,8	52,6	24,7	52,3
	MD _C	T ₅	-	-	14,1	42,3	14,8	44,0
		T ₆	-	-	16,2	46,6	16,7	47,7
		T ₇	-	-	17,9	49,6	17,9	49,7
F ₂	MD _A	T ₅	26,8	38,4	27,3	40,1	28,1	39,4
		T ₆	29,9	41,2	31,6	43,8	31,6	42,1
		T ₇	31,9	42,8	33,8	45,5	33,8	43,6
	MD _B	T ₅	21,3	36,3	22,0	38,5	22,7	38,1
		T ₆	24,0	39,1	25,9	42,3	25,8	40,9
		T ₇	25,7	40,8	27,9	44,2	27,8	42,5
	MD _C	T ₅	15,2	33,3	16,0	35,9	16,5	36,0
		T ₆	17,3	36,1	19,1	40,1	19,0	39,1
		T ₇	18,6	37,9	20,8	42,1	20,7	40,9

(*) Análise dos valores obtidos para o n^o de passagens do eixo padrão com geogrelha de reforço na posição R₁

(*) Análise dos valores obtidos para o n^o de passagens do eixo padrão com geogrelha de reforço na posição R₃

Na Figura 4.13 e na Figura 4.14 podem ser visualizados os valores de TBR obtidos para cada um dos critérios de degradação, consoante a classe de plataforma e a classe de tráfego. Optou-se por apresentar o valor da classe de tráfego para perceber o efeito que esta poderá ter com a aplicação da geogrelha no pavimento. Ambos os gráficos apresentam valores relativos a uma camada de mistura betuminosa de módulo de deformabilidade A.

Pela análise das figuras anteriores, as conclusões anteriores são reforçadas, ou seja, quando se aplica o critério de fadiga o n^o de passagens do eixo padrão tem um maior aumento para a fundação com melhores características, enquanto que no critério de deformação permanente, quanto mais fracas forem as propriedades dos materiais, melhor é o impacto da aplicação deste material. Em ambos os critérios, é de notar que à medida que o tráfego aumenta, ou seja, a espessura da camada betuminosa aumenta, ocorre um aumento do valor do TBR. Mais uma vez no critério de deformação permanente, os valores do TBR obtidos são superiores aos que se obtêm pelo critério de fadiga.

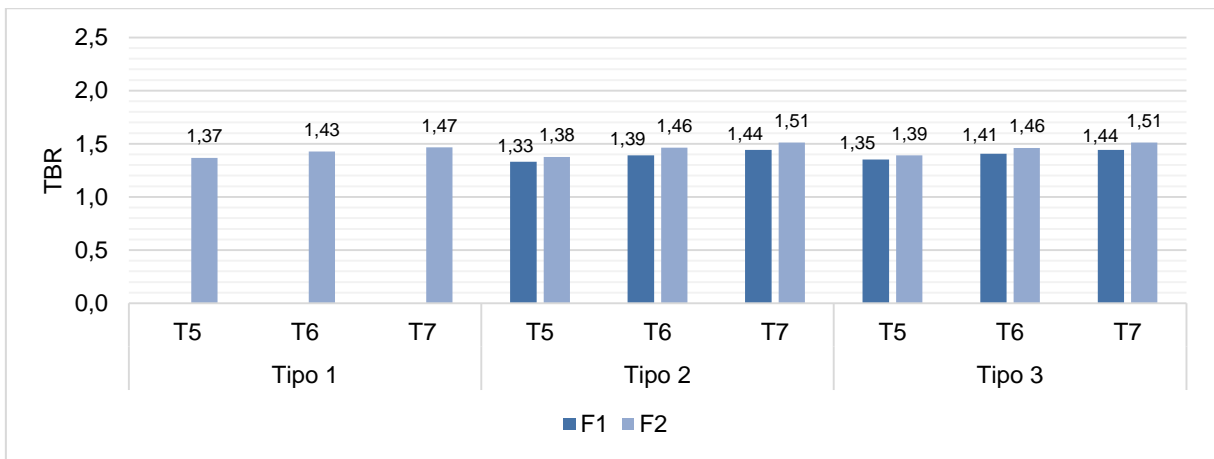


Figura 4.13: Comparação dos valores do TBR entre as duas classes de plataforma ao critério de fadiga para geogrelha na posição R_1 e classe MD_A .

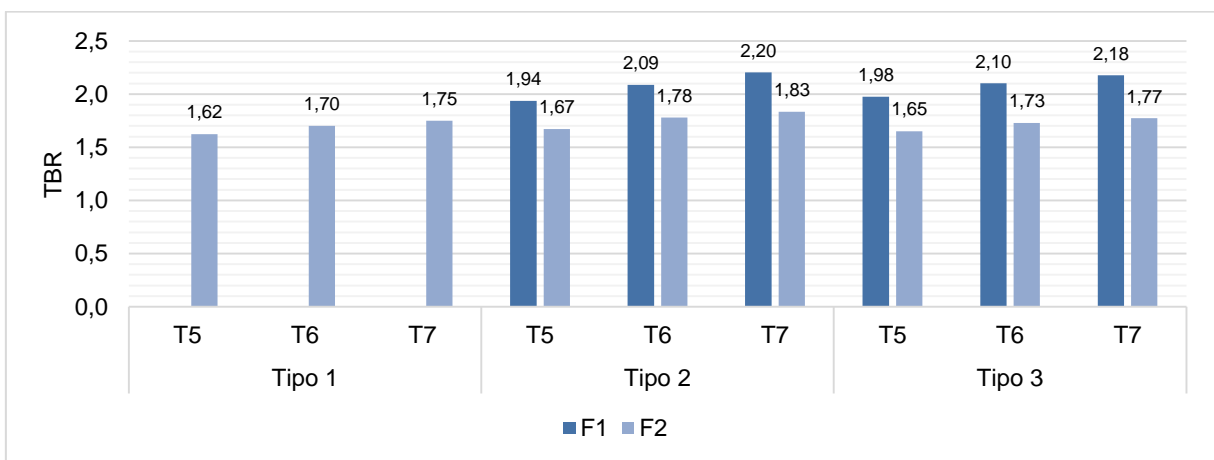


Figura 4.14: Comparação dos valores do TBR entre as duas classes de plataforma ao critério de deformação permanente para geogrelha na posição R_3 e classe MD_A .

4.4. Efeito do reforço na espessura das camadas

Com base na análise elaborada anteriormente, foi possível concluir que de facto com a aplicação de uma geogrelha de reforço, a capacidade de suporte do solo aumenta. Assim, é possível a um pavimento suportar um maior número de passagens por eixo padrão, quando para as mesmas condições iniciais se introduz uma geogrelha de reforço. Deste modo, e numa perspetiva de benefício económico relativo ao custo inicial da obra, surge uma análise de redução da espessura da camada de misturas betuminosas, quando é aplicado um geossintético. Assim, para o mesmo número de passagens da carga inicial sem reforço, viu-se até quanto se poderá reduzir a espessura da camada de misturas betuminosas, com a aplicação de um geossintético, de modo a verificar as mesmas condições.

Depois de realizadas as iterações com base no descrito anteriormente, verificou-se que a espessura da camada de misturas betuminosas conseguiria ter uma redução de 1 cm em cinco das soluções para o critério de fadiga, ao aplicar a geogrelha na posição R_1 e 1 a 2 cm quando analisado o critério

de deformação permanente, ao se aplicar uma geogrelha na posição R_3 consoante as características dos materiais constituintes do pavimento em questão. Na Figura 4.15 pode ser observada a variação do BLR para o número de passagens do eixo padrão sem reforço, para o critério de deformação permanente. Em relação aos valores do BLR para o critério de fadiga, conclui-se que estes não têm expressão, uma vez que para as mesmas condições apenas existe um valor diferente de 1,0.

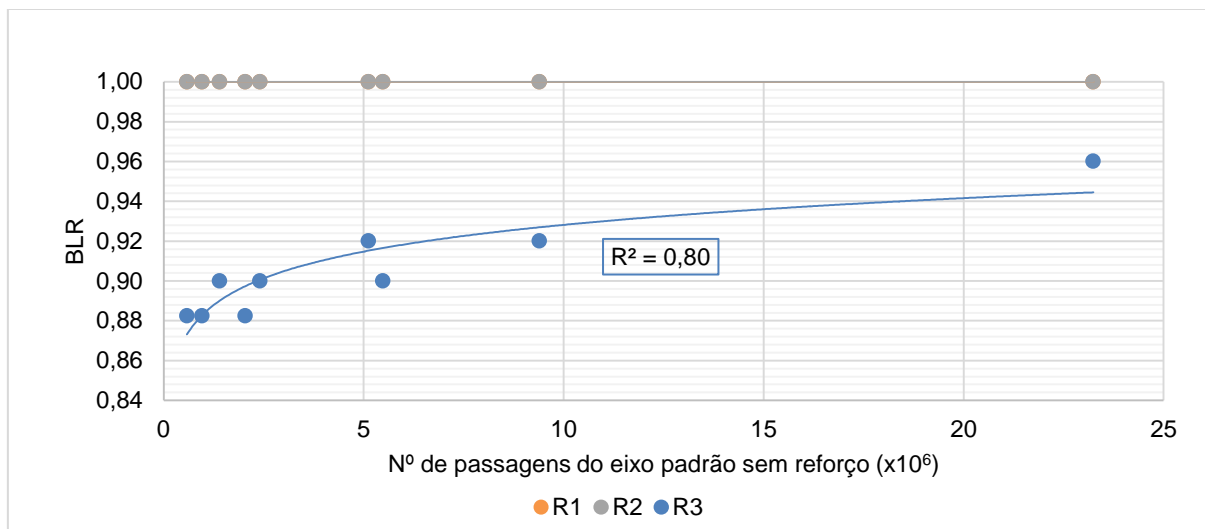


Figura 4.15: Número de passagens do eixo padrão sem reforço em função do BLR para o critério de deformação permanente de pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1 .

Através da observação da Figura 4.15 é possível verificar que para as posições R_1 e R_2 não há qualquer tipo de redução. Relativamente à posição R_3 verifica-se que à medida que aumenta o número de passagens do eixo padrão que o pavimento suporta sem reforço, maior é o valor do BLR, ou seja, menor é a redução possível na espessura da camada de misturas betuminosas. Conclui-se então que de facto as geogrelhas são mais adequadas para os casos onde os materiais constituintes da estrutura do pavimento apresentem propriedades reduzidas.

Na Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam-se os valores do BLR para cada classe de módulo de deformabilidade, para o critério de deformação permanente, consoante a classe de fundação ao aplicar uma geogrelha na posição R_3 .

Por observação das figuras, é de notar que há alguma dispersão ao nível da classe de plataforma, não se verificando critério para a redução da espessura da camada de misturas betuminosas. No entanto, verifica-se que para os três tipos de pavimento, à medida que o tráfego diminui, ou seja, a espessura da camada de misturas betuminosas diminui, menor é o valor do BLR, o que significa que corresponde a uma redução superior desta camada. Estes valores fazem referência às espessuras reduzidas, quando da aplicação de uma geogrelha de reforço na posição R_3 , uma vez que, como referido anteriormente, a melhoria para as outras posições, não é suficientemente benéfica para possibilitar a redução nesta camada.

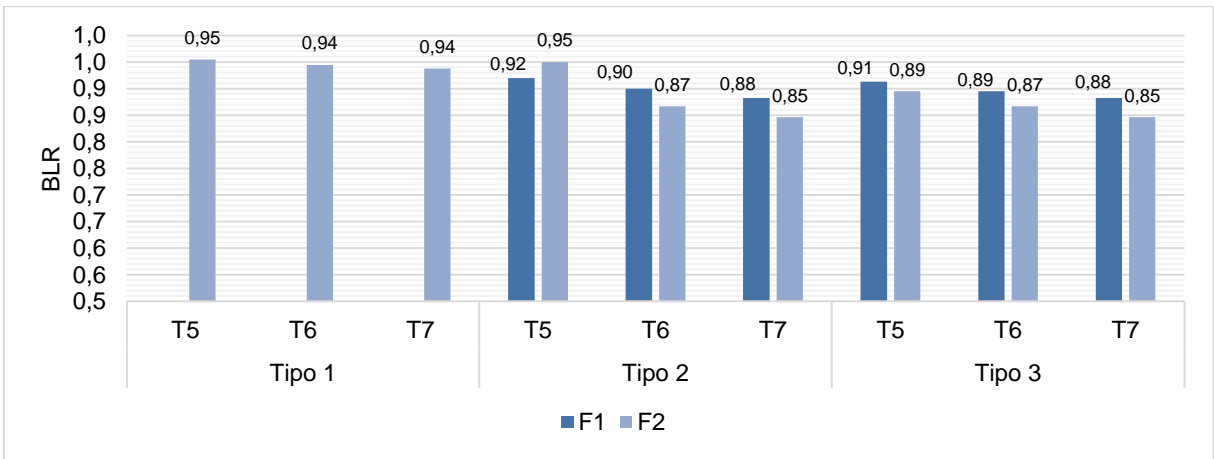


Figura 4.16: Comparação dos valores do BLR entre as duas classes de plataforma ao critério de deformação permanente para geogrelha na posição R_3 e classe MD_A .

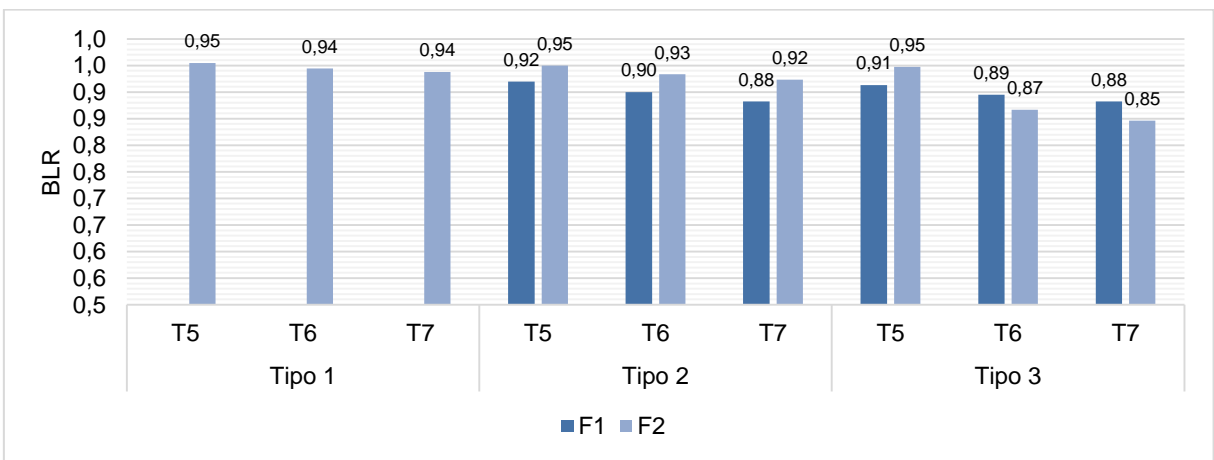


Figura 4.17: Comparação dos valores do BLR entre as duas classes de plataforma ao critério de deformação permanente para geogrelha na posição R_3 e classe MD_B .

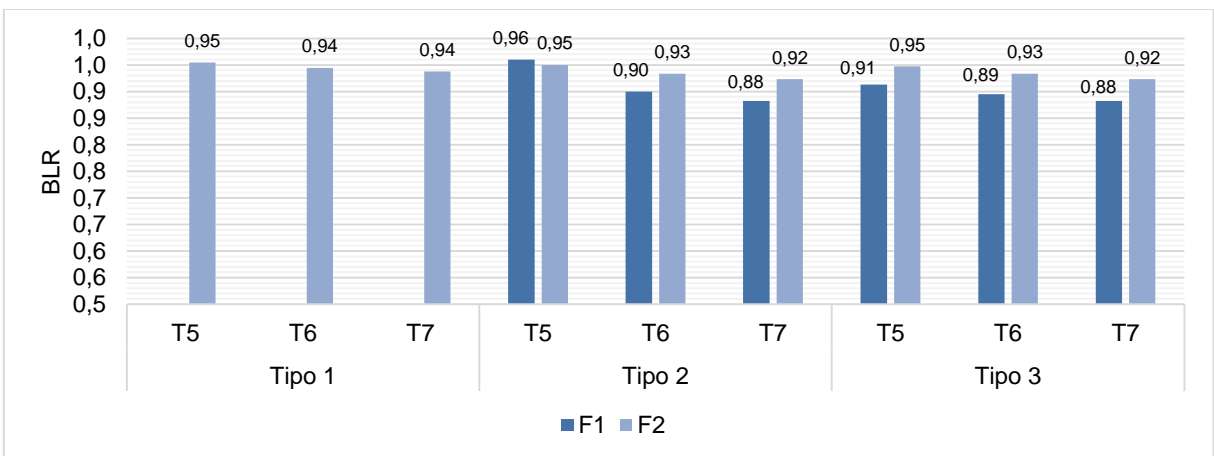


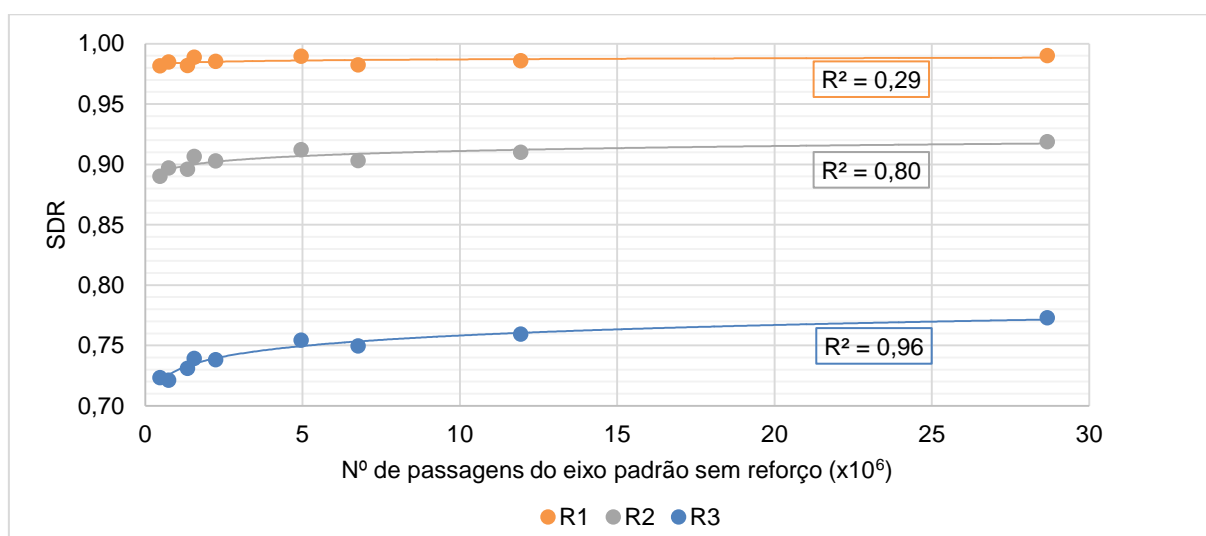
Figura 4.18: Comparação dos valores do BLR entre as duas classes de plataforma ao critério de deformação permanente para geogrelha na posição R_3 e classe MD_C .

Para além disto, é também de notar que consoante a rigidez da camada de misturas betuminosas, os valores do BLR diferem em relação à classe de fundação. Assim, quando se está presente de uma camada de misturas betuminosas com 3 000 MPa, ocorre uma redução superior por parte da classe

de plataforma F_2 , enquanto que quando se está presente de uma camada de misturas betuminosas com 6 000 MPa, dá-se uma redução superior quando existe uma classe de plataforma F_1 .

4.5. Efeito do reforço na deformação superficial

Em relação às deformações verticais e horizontais à superfície do pavimento, foram determinados os valores máximos destas para todos os casos em estudo. Na Figura 4.19 e na Figura 4.20 apresentam-se os gráficos referentes ao índice de redução da deformação horizontal e vertical, respetivamente em função do número de eixos padrão, com e sem reforço.



Legenda:

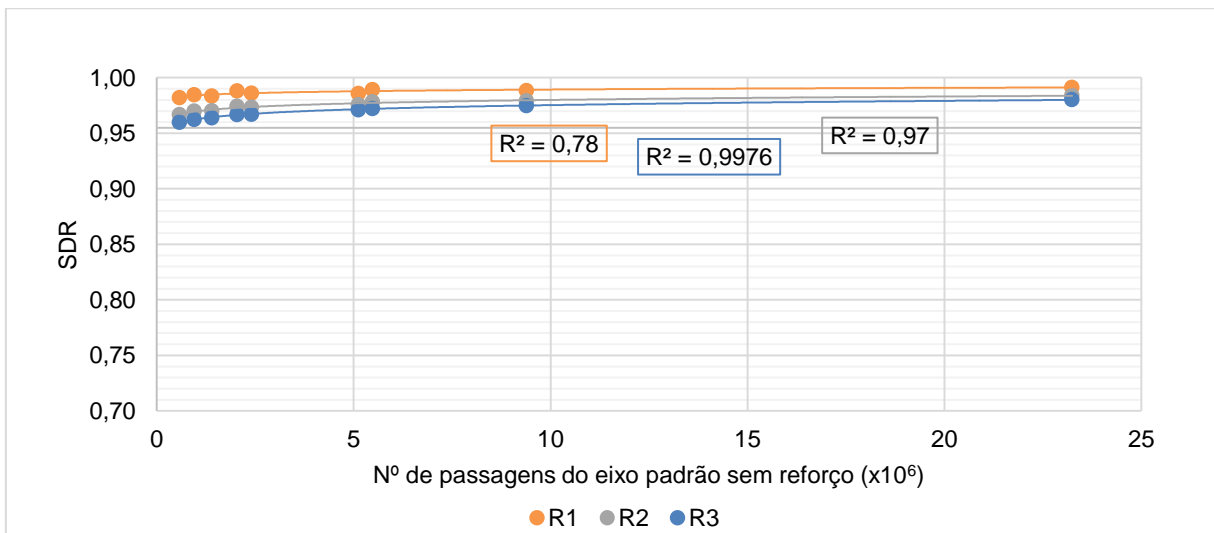
R1 – Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base

R2 – Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base

R3 – Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento

Figura 4.19: N.º de passagens do eixo padrão com reforço em função da deformação horizontal para pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1 .

Pela análise das figuras, verifica-se que quando a geogrelha de reforço é colocada entre a camada de sub-base e o leito do pavimento, há uma melhoria significativa, comparativamente com a aplicação a outras profundidades, no que diz respeito a ambas as deformações, sendo na deformação horizontal bastante mais evidente. Tal comportamento poderá estar relacionado com o facto desta se encontrar a reforçar o material menos resistente da estrutura e, pela geogrelha ter um melhor comportamento à tração.



Legenda:

R1 – Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base

R2 – Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base

R3 – Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento

Figura 4.20: Nº de passagens do eixo padrão com reforço em função da deformação vertical para pavimento tipo 2 e classe de plataforma F_1 .

Ao analisar a Figura 4.20 conclui-se que não há nenhuma posição para a geogrelha que sobressaia em relação às condições sem reforço. No entanto, para as soluções apresentadas, todas elas mostram resultados que contribuem para a redução das deformações.

Por observação da Figura 4.21 e da Figura 4.22 verifica-se que, à medida que o tráfego diminui, ocorre uma redução superior da deformação à superfície do pavimento, quando se aplica uma geogrelha de reforço, sendo esta mais evidente para a deformação horizontal. Esse comportamento verifica-se para as três localizações da geogrelha nos três tipos de pavimento, mas optou-se pela localização R₃, tanto para a deformação horizontal, como para a vertical. Esse aspeto foi considerado, uma vez que os valores correspondentes a uma maior redução, para ambos os critérios, verificam-se quando se aplica a geogrelha no topo da camada de leito do pavimento.

Analisando as figuras verifica-se que, tanto para a deformação horizontal como para o assentamento vertical, ocorre uma melhoria referente ao SDR. Apesar disto, verifica-se que os valores de redução para a deformação horizontal são bastante mais expressivos. É também de notar que quanto mais fracas forem as condições da fundação, maior é o impacto sentido no pavimento pela aplicação da geogrelha, se esta se localizar no topo da camada de leito do pavimento. O máximo valor de SDR obtido foi de 0,72, para a deformação horizontal.

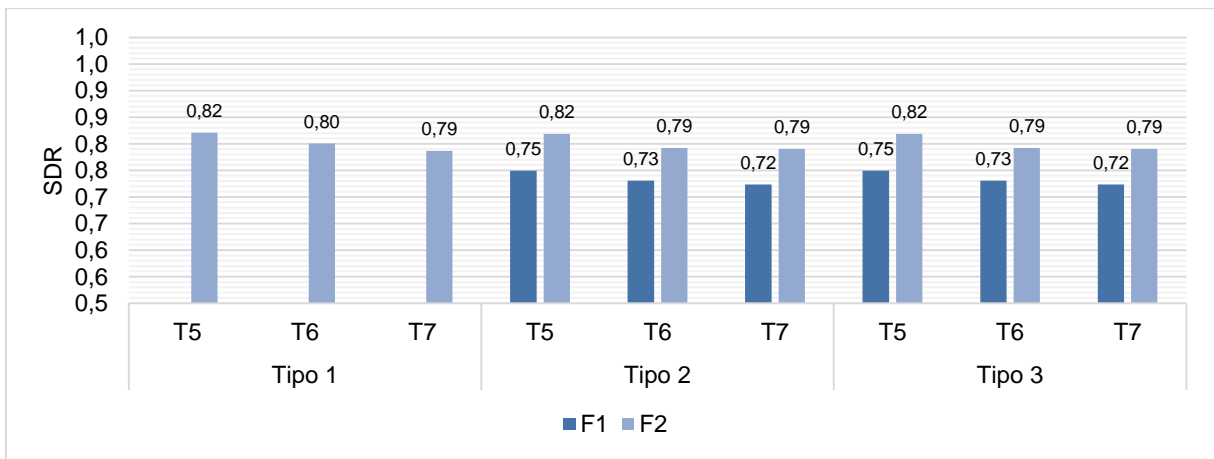


Figura 4.21: Comparação dos valores do SDR entre as duas classes de plataforma para a deformação horizontal com geogrelha na posição R_3 e classe MD_A .

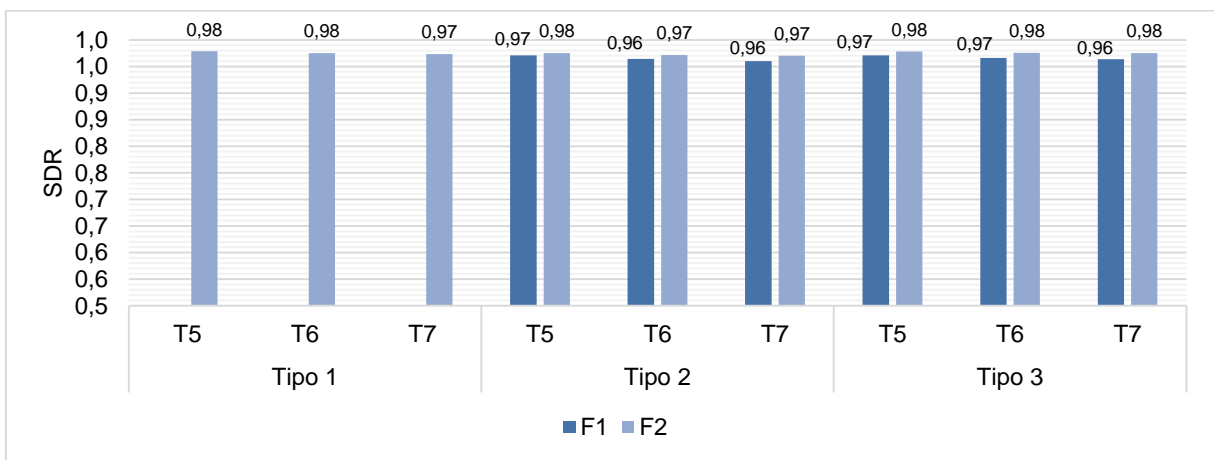


Figura 4.22: Comparação dos valores do SDR entre as duas classes de plataforma para a deformação vertical com geogrelha na posição R_3 e classe MD_A .

Da análise do mesmo gráfico, constata-se que à medida que o tráfego diminui, o valor de SDR diminui também, o que leva a crer que quanto menor for a espessura da camada de misturas betuminosas (menor tráfego), maior será o impacto da aplicação da geogrelha. Mais uma vez se comprova, que quanto piores forem as condições iniciais do pavimento, maior será o impacto da aplicação do reforço.

Na Figura 4.23 e Figura 4.24 apresenta-se a variação de cada uma das deformações, com e sem geogrelha de reforço ao longo da estrutura do pavimento. Estas figuras foram obtidas a partir do programa ADINA e pretendem ilustrar a variação da deformação ao longo das várias camadas, de modo a perceber qual o impacto no pavimento, com a aplicação da geogrelha de reforço.

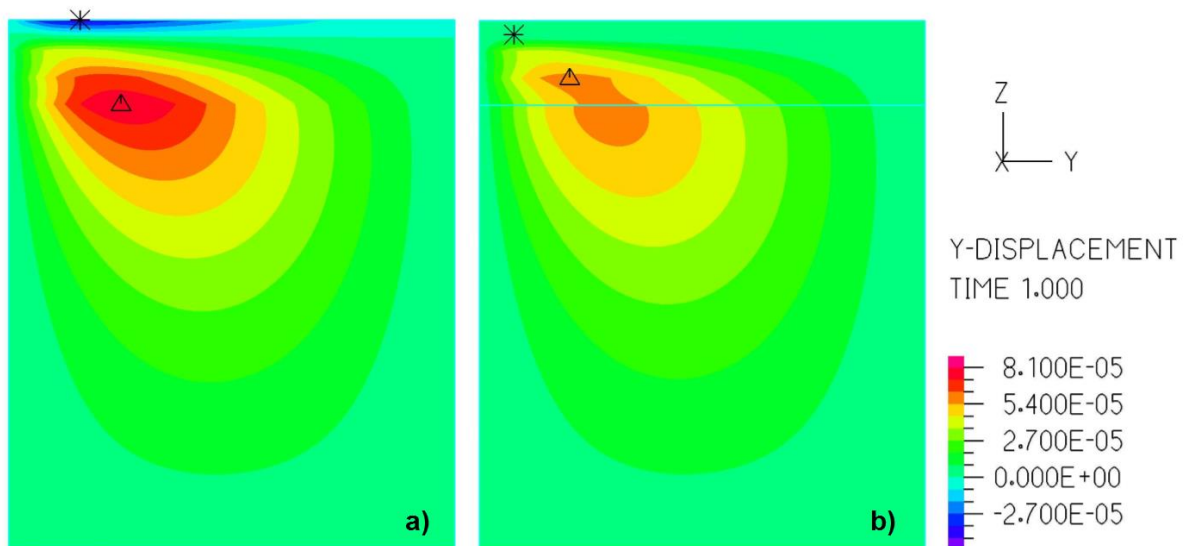


Figura 4.23: Variação da deformação horizontal da solução $2 MD_A T_7 F_1$ ao longo da estrutura do pavimento: a) sem reforço, R_0 ; e b) com geogrelha de reforço, R_3 .

Conforme analisado anteriormente, a redução da deformação horizontal apresenta valores bastante expressivos, situação que se pode igualmente verificar quando se observa a Figura 4.23. Verifica-se também, que com a aplicação da geogrelha acima do leito do pavimento, ocorre uma melhoria significativa das deformações, não só à superfície, onde foi medida esta deformação, como também ao longo de todo o pavimento.

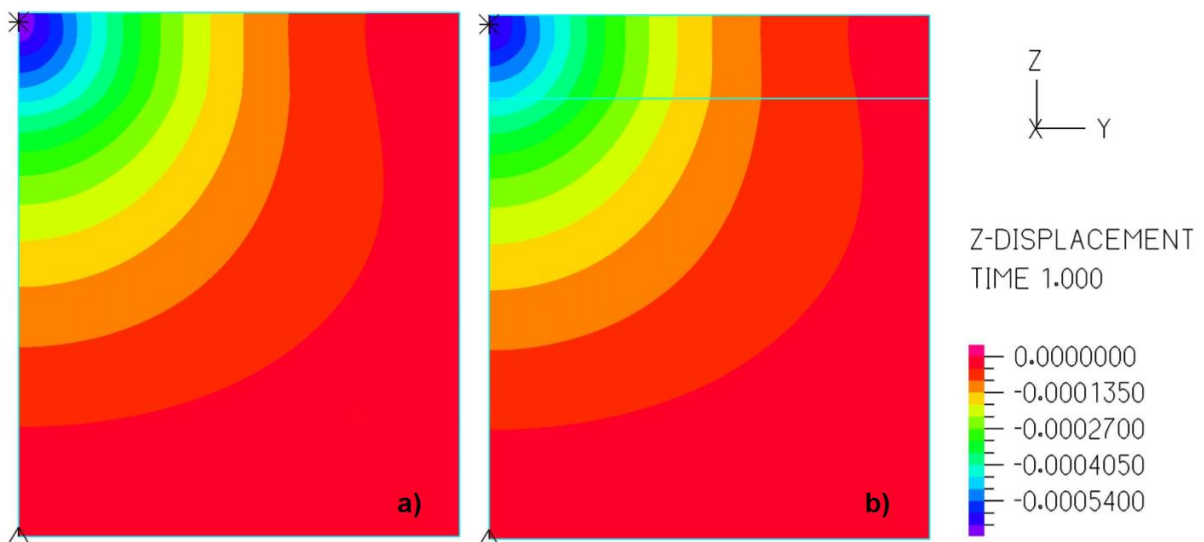


Figura 4.24: Variação da deformação vertical da solução $2 MD_A T_7 F_1$ ao longo da estrutura do pavimento: a) sem reforço, R_0 ; e b) com geogrelha de reforço, R_3 .

Relativamente ao assentamento vertical, os seus valores apresentam também melhorias, apesar de estes serem inferiores. Na Figura 4.24 ilustra-se a diferença de comportamento do pavimento, face à aplicação do geossintético e verifica-se que as diferenças não são significativas. Apenas no ponto de aplicação, ocorre uma diminuição da deformação de contacto. Verifica-se ainda que as localizações de máxima deformação à superfície têm localizações distintas para cada uma das deformações.

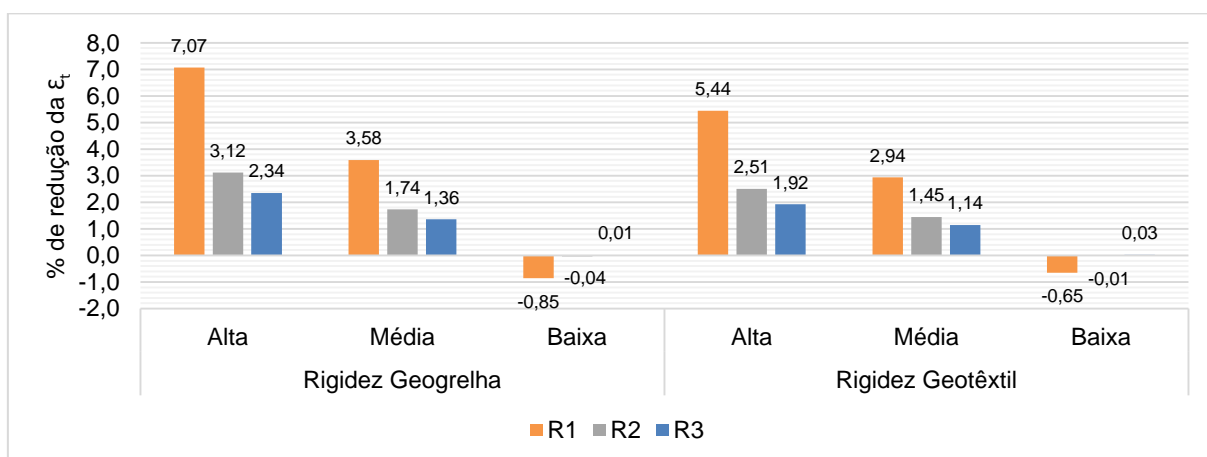
4.6. Efeito dos diferentes tipos de geossintéticos

Para estudar o impacto da rigidez dos geossintéticos quando aplicados na estrutura do pavimento, foram considerados dois tipos de geossintéticos com diferentes níveis de rigidez, alta, média e baixa. Na Figura 4.25 e na Figura 4.26 apresentam-se gráficos referentes à percentagem de redução da extensão para diferentes valores de rigidez, consoante a sua localização na estrutura do pavimento.

Pela observação das figuras é de verificar que quanto mais elevada é a rigidez do geossintético maior é a eficiência do geossintético no aumento da capacidade de carga da estrutura, obtendo-se uma maior redução das extensões. Para o critério de fadiga é de notar que este facto sucede quando o geossintético é colocado na posição R_1 , enquanto que para o critério de deformação permanente se verifica na posição R_3 , tal como seria de esperar com base nas conclusões retiradas anteriormente.

É ainda de salientar que, quando a rigidez do geossintético é baixa, o seu contributo na redução do valor da extensão é muito reduzido, demonstrando nalguns casos ser prejudicial, com o aumento da extensão face à situação sem geossintético.

No Anexo D apresentam-se todos os valores obtidos e utilizados para o estudo do impacto de diferentes tipos de geossintéticos.



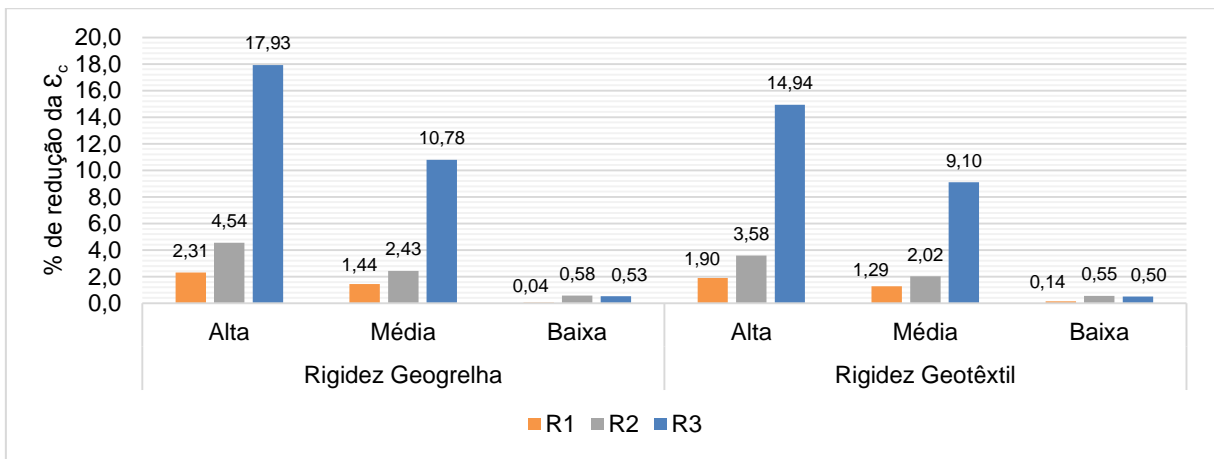
Legenda:

R1 – Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base

R2 – Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base

R3 – Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento

Figura 4.25: Comparação dos valores da % de redução da extensão de tração para o critério de fadiga para pavimento tipo 2, classe de plataforma F_1 , classe MD_A e classe de tráfego T_7 .



Legenda:

R1 – Geogrelha de reforço entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base

R2 – Geogrelha de reforço entre as camadas de base e sub-base

R3 – Geogrelha de reforço entre a camada de sub-base e o leito do pavimento

Figura 4.26: Comparação dos valores da % de redução da extensão de compressão para o critério de deformação permanente para pavimento tipo 2, classe de plataforma F_1 , classe MD_A e classe de tráfego T_7 .

4.7. Análise de modelos não lineares

Como referido anteriormente, realizou-se uma modelação onde se considerou um modelo não linear, CamClay, para a fundação da estrutura do pavimento. Esta análise foi abordada com o intuito de avaliar os resultados obtidos com ambos os modelos, linear e não linear, para de um modo geral perceber se ocorreram alterações significativas ao utilizar o modelo linear. Para tal, considerou-se apenas a solução $2 F_2 MD_A$, para as classe de tráfego T_5 e T_7 e para as três localizações da geogrelha com rigidez alta. No Quadro 4.2 apresentam-se os valores obtidos de TBR para as soluções em análise, tendo em consideração os critérios de fadiga e de deformação permanente.

Quadro 4.2: Valores de TBR obtidos para o modelo CamClay.

Teste		e_U [cm]	CF		CDP		
			TBR	$TBR_{CamClay}$	TBR	$TBR_{CamClay}$	
$2 F_2 MD_A$	T_5	R_1	20	1,376	1,375	1,074	1,073
		R_2		1,118	1,122	1,122	1,103
		R_3		1,080	1,089	1,671	1,550
	T_7	R_1	13	1,512	1,511	1,090	1,089
		R_2		1,144	1,148	1,130	1,111
		R_3		1,084	1,093	1,834	1,684

Pela observação do quadro é de verificar que os valores de TBR obtidos para um modelo linear são muito semelhantes aos valores obtidos para um modelo não linear, apresentando ligeiras diferenças que não são significativas. Daqui se conclui que se este modelo fosse considerado as conclusões obtidas seriam equivalentes e a modelação teria sido mais complexa.

No Anexo E apresentam-se todos os valores obtidos e utilizados para a análise de modelos não lineares.

4.8. Considerações finais

Depois de analisar os resultados obtidos concluiu-se que os geossintéticos têm, na sua generalidade, um impacto positivo quando aplicados em pavimentos rodoviários. Para os vários estudos efetuados demonstrou-se que a sua aplicação apresenta sempre melhorias, com especial foco em pavimentos com fracas características de fundação, onde se registaram os valores mais elevados. Foram também efetuados estudos que demonstraram que a rigidez do geossintético é um fator determinante para o benefício do pavimento uma vez que quanto maior a rigidez o geossintético maior a redução da extensão, ou seja, maior capacidade de suporte. Para além disto, a análise de uma fundação com um comportamento não linear foi também interessante, pois determinou-se que a consideração de modelos lineares não afeta os resultados e conclusões obtidas anteriormente.

Como referido anteriormente, as conclusões retiradas dizem respeito a um estudo técnico. De facto, para determinar a viabilidade deste material é necessário ter em conta outras vertentes, como o estudo de viabilidade económica e ambiental. Uma das conclusões obtidas anteriormente foi a respeito da redução da espessura da camada de misturas betuminosas, que consiste na camada com maior encargo económico das camadas constituintes de um pavimento rodoviário. Ao ocorrer uma redução na espessura desta em 1 ou 2 cm, como visto anteriormente, é ainda necessário ter em consideração o impacto que esta redução poderá ter em termos de custos, e se de facto é uma solução a ter em conta. Mesmo assim, a aplicação deste material aumenta a capacidade de carga da fundação, consoante o local de aplicação, se se pretender um aumento de tráfego. Todas estas questões têm de ser consideradas caso se pretenda determinara a viabilidade de aplicação deste material.

Colocam-se ainda algumas questões ambientais, como é o caso deste material poder ser reciclado com os restantes materiais constituintes do pavimento. Uma questão pertinente que poderá ser desenvolvida no futuro.

5. Conclusões e trabalho futuro

5.1. Conclusões gerais

Conforme foi possível apreciar nos termos descritos, os geossintéticos são componentes que têm vindo a ser utilizados para desempenhar diversas funções no contexto da via rodoviária. Entre as várias funções que este material pode desempenhar, destaca-se o reforço estrutural que este material acrescenta, quando inserido na estrutura de um pavimento.

São várias as vantagens a nível técnico que resultam da aplicação deste material, com particular destaque para a possibilidade que oferecem de reduzir a espessura das camadas, ou limitar a quantidade de solo de fundação a ser removido quando este tem propriedades fracas. Acresce referir as vantagens que introduzem a nível de suporte, ou seja, com a sua utilização e sem a redução do pavimento base, o solo consegue alcançar outro nível de carga, melhorando consideravelmente as suas características em situações que à partida não se poderiam considerar as melhores.

Mediante a aplicação de geossintéticos de reforço, conclui-se que é sempre possível melhorar as condições de base, apesar de esta melhoria ser bastante mais acentuada quando se está em presença de solos com más características. É pois necessária uma avaliação, caso a caso das condições do pavimento, para avaliar se de facto fará sentido a sua aplicação.

No entanto, apesar do impacto positivo que este material poderá introduzir na estrutura do pavimento, é necessário ter em atenção que apenas tal melhoria acontece caso ocorra uma correta aplicação do mesmo, que garanta a aderência necessária solo-pavimento.

Relativamente aos tipos de materiais existentes, existem atualmente no mercado variadas soluções para o reforço de pavimentos, principalmente ao nível de geogrelhas e geotêxteis aplicáveis a pavimentos com camada de misturas betuminosas. As geogrelhas são a solução mais utilizada com este objetivo e tem vindo igualmente a ser utilizada no reforço de pavimentos para prevenir a reflexão de fendas. Os geotêxteis, poderão ter também outras vertentes, como sejam a filtragem e a separação, pelo que são mais utilizados quando para além do reforço, também se pretende atuar a esses níveis.

Relativamente a pavimentos sem camada de misturas betuminosas, não foi elaborado um estudo tão aprofundado, mas entende-se que este material trará vantagens, uma vez que permite conferir uma

maior rigidez e capacidade de suporte, quando aplicado em pavimentos com más características materiais, conferindo-lhes a rigidez necessária.

Foi elaborada uma análise por elementos finitos em 2D, com recurso ao *software ADINA*, com o objetivo de analisar o impacto dos geossintéticos de forma mais abrangente. A análise por elementos finitos, foi dedicada ao estudo dos pavimentos mais comuns em Portugal, por forma a avaliar qual a influência da aplicação de geossintéticos em pavimentos com características específicas Nacionais. Esta análise foi elaborada em 2D, em estado axissimétrico, o que reproduziu a carga final, tal como os modelos executados pela Shell.

Para melhor perceber e interpretar os dados, foram formuladas diversas hipóteses onde se fizeram variar as espessuras das várias camadas, as propriedades dos materiais, o tipo de tráfego e, finalmente, a profundidade de colocação do geossintético.

Depois de analisados os resultados, é possível concluir que de facto ocorre uma melhoria para todas as soluções, mas existem casos onde esta é mais significativa. No que diz respeito ao critério da resistência à fadiga, as maiores reduções das extensões de tração, ao nível da interface entre a camada de misturas betuminosas e a camada de base, dão-se quando se aplica uma geogrelha nesta mesma localização, ocorrendo um impacto considerável em comparação com as outras soluções. Verificou-se também, que quanto mais delgada é a camada de misturas betuminosas, maior é a percentagem de redução face à aplicação da geogrelha.

Quanto ao critério de deformação permanente, as conclusões retiradas foram bastante semelhantes, embora para este caso, a aplicação da geogrelha no topo da camada do leito do pavimento, se tenha obtido as melhorias mais consideráveis comparativamente à solução sem geossintético. Mesmo assim, provou-se que o impacto da geogrelha está diretamente relacionado com as propriedades dos materiais, uma vez que quanto mais fracas são essas características, maiores são os níveis de melhoria associados à aplicação deste material. Este aspeto já tinha sido demonstrado noutros estudos que foram igualmente analisados.

É de salientar que no artigo de Saad et al (2006) ou na dissertação de Bohagr (2013) onde se utilizam basicamente os mesmos parâmetros, nos ensaios de deformação permanente a melhoria relacionada com a geogrelha no topo da camada de leito do pavimento não é tão evidente como nos pavimentos utilizados nas soluções dimensionadas neste trabalho. Tal poderá estar relacionado com as propriedades dos materiais ou com a utilização de camadas de base mais delgadas.

Tendo em vista obter um benefício económico com a aplicação de geossintéticos, procurou-se elaborar um estudo que, para o mesmo valor de número de passagens do eixo padrão suportada, pudesse reduzir a espessura da camada betuminosa, uma vez que esta representa o maior custo por área no conjunto do material constituinte do pavimento. Neste contexto surgiu o BLR que depois de analisados os resultados, apenas se fez sentir na posição R_1 , para o critério de fadiga e na posição R_3 para o critério de deformação permanente. Este obteve valores entre 0,846 e 1,0 que representam

entre 1 a 2 cm de espessura de redução. No critério de fadiga, apenas algumas soluções conseguiram satisfazer estes valores, enquanto que no critério de deformação permanente todas as soluções verificaram os valores mencionados.

De um modo geral, apesar das melhorias em todas as soluções em análise, este material aplicado a soluções de base portuguesa, não obteve o impacto esperado. Se se pretender aumentar o nível de tráfego numa estrada, a utilização deste material poderá representar uma mais-valia face à opção de aumentar a camada de betuminoso. Mas, numa perspetiva de viabilidade do material em geral, é ainda necessário ter em conta outras vertentes, tais como económica e ambiental. Não obstante, se esta aplicação ocorrer num pavimento de classe F₁, onde as características do solo são mais fracas, conseguirá obter-se uma redução até 2 cm, quando se aplica a geogrelha em camada de fundação.

5.2. Trabalho futuro

Para além do trabalho desenvolvido nesta dissertação, muitas outras soluções podem ser adotadas. A aplicação deste material em estradas sem revestimento de camada ligada é um tema que poderá ser significativamente explorado, uma vez que possui os requisitos necessários para aplicação nessas vias. Diversos trabalhos apresentam amostras com aplicação deste geossintético incorporado a várias profundidades no interior da camada granular, ou mesmo da camada de misturas betuminosas. E, em diversos casos essa solução demonstrou permitir alcançar resultados significativos, comparativamente aos que se obtiveram no âmbito da presente dissertação.

Para uma melhor avaliação dos resultados obtidos, poderá adicionalmente ser efetuada uma análise custo-benefício da aplicação de geossintéticos, numa perspetiva de redução da espessura da camada de misturas betuminosas e da consequente redução de custo associada. Esse estudo permitiria também uma visão mais rigorosa do benefício que é retirado da aplicação deste geossintético.

Através da análise por elementos finitos, poderão vir a ser desenvolvidos novos estudos associados à variação de parâmetros, que não executados no âmbito deste trabalho. A título de exemplo, poderão simular-se outros tipos de geossintéticos, que conduzam a melhorias consideráveis em pavimentos com fracas propriedades, como é o caso das geocélulas. A avaliação da influência da rigidez do geossintético em pavimentos rodoviários, consoante as propriedades dos materiais e a forma como esse parâmetro influencia o comportamento da estrutura, seria igualmente um estudo cuja formulação seria de grande interesse.

Na modelação numérica efetuada foram introduzidas simplificações, como seja a perfeita aderência entre as várias camadas do pavimento. Nesse contexto o desenvolvimento de um modelo com coeficientes de aderência entre camadas seria também de interesse para um novo estudo, pois traduzia melhor a realidade que se faz sentir no terreno.

Salienta-se que as considerações efetuadas ao nível da modelação da carga aplicada nas soluções tiveram como base modelos da Shell. Em trabalhos futuros poderá ser usada uma abordagem diferente, que permita efetuar uma comparação com os valores apresentados neste estudo.

No contexto do desenvolvimento da viabilidade ambiental, surge também a pertinência de um estudo que incida na reciclabilidade dos geossintéticos quando integrados na estrutura do pavimento.

Referências Bibliográficas

- Abu-Farsakh, M. Y., & Chen, Q. (2011). Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 12, 275-288. doi:10.1080/10298436.2010.549565
- Barksdale, R. D., Brown, S. F., & Chan, F. (1989). Potential Benefits of Geosynthetics in Flexible Pavement Systems. Transportation Research Board. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program Report No. 315.
- Basu, G., Roy, A. N., Bhattacharyya, S. K., & Ghosh, S. K. (2009). Construction of unpaved rural road using jute-synthetic blended woven geotextile - A case study. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 506-512.
- Bathurst, R. J. (s.d. a). Funções dos Geossintéticos. Folheto Técnico. IGS Portugal.
- Bathurst, R. J. (s.d. b). Classificação de Geossintéticos. Folheto Técnico. IGS Portugal.
- Benmebarek, S., Remadna, M. S., & Lamine, B. (2013). Numerical modeling of reinforced unpaved roads by geogrid. *The Online Journal of Science and Technology*, 3(Issue 2), 109-115.
- Bohagr, A. A. (2013). Finite Element Modeling of Geosynthetic Reinforced Pavement Subgrades. Master Thesis. Washington: Department of Civil and Environmental Engineering of Washington State University.
- Burd, H. J., & Brocklehurst, C. J. (1990). Finite Element Studies of the Mechanics of Reinforced Unpaved Roads. *Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles* (pp. 217-221). Netherlands: Geomembranes and Related Products.
- Burd, H. J., & Houlsby, G. T. (1986). A Large Strain Finite Element Formulation for One Dimensional Membrane Elements. *Computers and Geotechnics*, 2, 3-22.
- Dondi, G. (1994). Three-Dimensional Finite Element Analysis of a Reinforced Paved Road. *Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, (pp. 95-100). Singapore.
- Dourado, F., & Scherer, J. (2005). Uso de novos materiais em forma de grelhas pré-Revestidas de Betume para reforço de pavimentos rodoviários. S&P Clever Reinforcement Ibérica, Lda.
- Erickson, H., & Drescher, A. (2001). The use of geosynthetics to reinforce low volume roads. Minnesota: Minnesota Department of Transportation.
- Ferrotti, G., Canestrari, F., Pasquini, E., & Virgili, A. (2012). Experimental evaluation of the influence of surface coating on fiberglass geogrid performance in asphalt pavements. *Geotextiles and Geomembranes*, 34, 11-18.
- Geosystems. (s.d.). Presto Geosystems Global Leader Global Partner. Obtido em Maio de 2015, de http://www.prestogeo.com/geoweb_cellular_confinement
- Graziani, A., Pasquini, E., Ferrotti, G., Virgili, A., & Canestrari, F. (2014). Structural response of grid-reinforced bituminous pavements. *Materials and Structures*, 1391-1408. doi:10.1617/s11527-014-0255-1

- Hufenus, R., Rueegger, R., Banjac, R., Mayor, P., Springman, S. M., & Bronnimann, R. (2006). Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 21-37.
- JAE. (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos Para a Rede Rodoviária Nacional*. Junta Autónoma de Estradas.
- Jan-Maarten, E. (2004). Building Roads on Sabkha Soils with Geosynthetic Systems. *Proceedings of 2nd Golf Conference* (pp. 1-12). Abu Dhabi: UAE.
- Kim, M., & Lee, J. H. (2013). Effects of geogrid reinforcement in low volume flexible pavement. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19:sup1, S14-S22. doi:10.3846/13923730.2013.793606
- Ladeira, M. (1995). *Estudo dos fenómenos de interacção solo-geossintético através de ensaios de arranque*. Porto: Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil. Universidade do Porto, FEUP.
- Lima, H. (s.d.). *Geomateriais aplicados em camada de leito de pavimento entre 2001 e 2012*. Estradas de Portugal S.A.
- Lopes, C. (2001). *Estudo da Interacção Solo-Geossintético através de Ensaios de corte em Plano Inclinado*. Tese de Mestrado. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Marcelino, P., Freire, A. C., & Costa, P. (2014). Avaliação da interface entre camadas ligadas com aplicação de grelhas de reforço de pavimentos pelo método de Leutner modificado. 1-9.
- Miura, N., Sakai, A., Taesiri, Y., Yamanouchi, T., & Yasuhara, K. (1990). Polymer Grid Reinforced Pavement on Soft Clay Grounds. *Geotextiles and Geomembranes*, 9, 99-123.
- Mounes, S. M., Karim, M. R., Mahrez, A., & Khodaii, A. (2011). An overview on the use of geosynthetics in pavement structures. *Scientific Research and Essays*, 6(11), 2234-2241. doi:10.5897/SRE10.960
- Naeini, S. A., Khalaj, M., & Izadi, E. (2012). Interfacial shear strength of silty sand-geogrid composite. *Geotechnical Engineering*, 166, 67-75.
- Palmeira, E. M. (s.d.). *Geossintéticos na Engenharia Rodoviária*. Folheto Técnico. IGS Portugal.
- Palmeira, E. M., & Antunes, L. G. (2010). Large scale tests on geosynthetic reinforced unpaved roads subjected to surface maintenance. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 547-558.
- Perkins, S. W. (2001). *Numerical Modeling of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements*. Montana State University.
- Perkins, S. W., Christopher, B. R., Cuelho, E. L., Eiksund, G. R., Schwartz, C. S., & Svano, G. (2009). A mechanistic-empirical model for base-reinforced flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 10:2, 101-114. doi:10.1080/10298430802009646
- Pinto, A. E. (2005). *Aplicação de Geossintéticos em Linhas-Férreas Estudo Laboratorial dos Fenómenos de Danificação Durante a Instalação e Abrasão nos Materiais*. Tese de Mestrado. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- S&P. (s.d.). S&P Clever Reinforcement Company. Obtido em Julho de 2015, de <http://www.sp-reinforcement.com.br/pavimento-carbophalt/>
- Saad, B., Mitri, H., & Poorooshab, H. (2006). 3D FE Analysis of Flexible Pavement with Geosynthetic Reinforcement. *Journal of Transportation Engineering*, 402-415.

- Shell. (1978). Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic. Shell International Petroleum Company. London, UK.
- Sivapragasam, C., Arun, V. M., Vanitha, S., & Sutharsanam, S. (2010). Study on Synthetic Geotextiles for Road Pavements. Indian Geotechnical Conference, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay, 16-18.
- Stephen Archer, P. (2008). Subgrade Improvement for Paved and Unpaved Surfaces Using Geogrids. Professional Development Hours CE News.
- Stikan, R. P. (2006). Tensores fundamentais da formulação dos problemas elásticos exissimétricos pelo método dos elementos de contorno. Tese de Mestrado. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo.
- Subaida, E. A., Chandrakaran, S., & Sankar, N. (2009). Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 2014-210.
- TENSAR. (s.d.). TENSAR. Obtido em Agosto de 2015, de TENSAR: <http://www.archiexpo.com/prod/tensar-international/product-63203-246435.html>
- Thakur, J. K., Han, J., Pokharel, K. S., & Parsons, R. L. (2012). Performance of geocell-reinforced recycled asphalt pavement (RAP) bases over weak subgrade under cyclic plate loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 35, 14-24.
- Yang, X., Han, J., Pokharel, S. K., Manandhar, C., Parsons, R. L., Leshchinsky, D., & Halahmi, I. (2012). Accelerated pavement testing of unpaved roads with geocell-reinforced sand bases. *Geotextiles and Geomembranes*, 32, 95-103.
- Zornberg, J. G. (2013). Sistemas de pavimentos reforzados con geosintéticos. *Ingeniería Civil*, 5-25.
- Zornberg, J. G. (2015). T9 - Geosynthetics in Roadway Applications. Workshop Educate The Educators. Lisbon: IGS Portugal Comissão Portuguesa de Geossintéticos.

ANEXOS

Anexo A

Quadro A.1: Resumo que contempla as várias fontes de informação de cada um dos tipos de geomateriais analisados.

		Técnicas de reforço		Modelação Numérica	Ensaio/Programa	Referências
Pavimentado	Pavimento	Geogrelha	Fibra de Carbono	Campo	Medições de deflexão (S&P)	(Dourado e Scherer, 2005)
				Campo	FWD	(Graziani et al, 2014)
		Fibra de Vidro	Campo	FWD		
			Laboratório (LNEC)	Ensaio de <i>Leutner</i> modificado*	(Marcelino et al, 2014)	
			Laboratório	Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument	(Ferrotti et al, 2012)	
				Ancona Shear Testing Research and Analysis		
	Four-point bending test device					
	Pull-out test					
	Fundação	Geotêxtil não tecido	Polipropileno	Laboratório	California Bearing Ratio test Unconfined Compression Test	(Sivapragasam et al, 2010)
		Geocélulas	NPA (Novel Polymeric Alloy)	Laboratório	Cyclic Plate Load Test	
Geogrelha		Polipropileno	Laboratório	Cyclic Plate Load Test	(Abu-Farsakh e Chen, 2011)	
Não pavimentado	Camada de superfície	Vários		Campo	Compaction controls Deformation measurements	(Hufenus et al, 2006)
		Geocélulas	NPA (Novel Polymeric Alloy)	Laboratório	Accelerated pavement test	
		Geotêxtil	Fibra vegetal + Polietileno de alta densidade	Campo	Instron tensile tester (model 4411)	(Basu et al, 2009)
					Hydraulic property (test)	
	Fundação	Geotêxtil	Fibra orgânica	Laboratório	Cyclic loading tests	(Subaida et al, 2009)
		Geogrelha	Polipropileno	Laboratório	Cyclic loading tests	(Palmeira e Antunes, 2010) e (Stephen Archer, 2008)

*Não contemplado no texto porque faz referência a estudo da geogrelha para evitar reflexão de fendas

Anexo B

Quadro A.2: Valores de dano de fadiga para as várias soluções em estudo.

<i>Teste</i>	e_U [cm]	$\epsilon_{t \max} (\times 10^{-6})$	V_b [%]	E_m [MPa]	$N_{80} (\times 10^6)$	$N_p (\times 10^6)$	RD [%]
1 $MD_B T_5 F_2 R_0$	22	121,1	9,00	4 000	10,45	8,0	76,6
1 $MD_B T_6 F_2 R_0$	18	157,3			2,83	2,0	70,8
1 $MD_B T_7 F_2 R_0$	16	181,4			1,39	1,0	70,8
2 $MD_B T_5 F_1 R_0$	25	111,4			15,86	8,0	50,4
2 $MD_B T_6 F_1 R_0$	20	151,4			3,42	2,0	58,5
2 $MD_B T_7 F_1 R_0$	17	185,8			1,23	1,0	79,8
2 $MD_B T_5 F_2 R_0$	20	119,6			11,12	8,0	71,9
2 $MD_B T_6 F_2 R_0$	15	163,0			2,36	2,0	84,6
2 $MD_B T_7 F_2 R_0$	13	187,3			1,18	1,0	83,1
3 $MD_B T_5 F_1 R_0$	23	121,6			10,23	8,0	78,2
3 $MD_B T_6 F_1 R_0$	19	156,2			2,93	2,0	68,3
3 $MD_B T_7 F_1 R_0$	17	178,9			1,48	1,0	66,0
3 $MD_B T_5 F_2 R_0$	19	121,7			10,19	8,0	78,5
3 $MD_B T_6 F_2 R_0$	15	155,5			2,99	2,0	66,8
3 $MD_B T_7 F_2 R_0$	13	178,6			1,50	1,0	65,5

Quadro A.3: Valores de dano de deformação permanente para as várias soluções em estudo.

Teste	e_U [cm]	$\epsilon_{c \max} (\times 10^6)$	$N_{80} (\times 10^6)$	$N_p (\times 10^6)$	RD [%]
1 $MD_B T_5 F_2 R_0$	22	314,1	10,78	8,0	74,2
1 $MD_B T_6 F_2 R_0$	18	414,7	3,55	2,0	56,3
1 $MD_B T_7 F_2 R_0$	16	484,1	1,91	1,0	51,3
2 $MD_B T_5 F_1 R_0$	25	324,6	9,46	8,0	84,6
2 $MD_B T_6 F_1 R_0$	20	447,3	2,62	2,0	76,3
2 $MD_B T_7 F_1 R_0$	17	556,7	1,09	1,0	89,7
2 $MD_B T_5 F_2 R_0$	20	301,1	12,77	8,0	62,6
2 $MD_B T_6 F_2 R_0$	15	418,2	3,43	2,0	58,3
2 $MD_B T_7 F_2 R_0$	13	483,4	1,92	1,0	51,0
3 $MD_B T_5 F_1 R_0$	23	321,6	9,81	8,0	81,5
3 $MD_B T_6 F_1 R_0$	19	412,3	3,63	2,0	55,1
3 $MD_B T_7 F_1 R_0$	17	472,2	2,11	1,0	46,4
3 $MD_B T_5 F_2 R_0$	19	265,3	21,19	8,0	37,8
3 $MD_B T_6 F_2 R_0$	15	336,8	8,16	2,0	24,5
3 $MD_B T_7 F_2 R_0$	13	382,5	4,90	1,0	20,0

Anexo C

Quadro A.4: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 1 e classe de plataforma F_2 .

Tipo 1																		
Teste			e_U [cm]	ε_t ($\times 10^{-6}$)	V_b	E_m [MPa]	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ε_t ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_H ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR					
F_2	MD_A	T_5	R_0	22	163,2	9,00	3 000					0,0404						
			R_1		153,3			5,388	1,366	22	-	1,000	0,0397	0,983				
			R_3		160,3			4,321	1,096	22	-	1,000	0,0331	0,821				
		T_6	R_0	18	213,9			1,019						0,0491				
			R_1		199,2			1,455	1,427	17	213,5	0,944	0,0482	0,981				
			R_3		209,7			1,127	1,106	18	-	1,000	0,0393	0,800				
		T_7	R_0	16	247,3			0,494						0,0546				
			R_1		229,0			0,725	1,468	15	246,1	0,938	0,0535	0,980				
			R_3		242,1			0,550	1,113	16	-	1,000	0,0430	0,787				
		MD_B	T_5	R_0	22			132,4	9,00	4 000						0,0357		
				R_1				126,2			6,685						0,0357	
				R_3				130,3			8,498	1,271	22	-	1,000	0,0353	0,987	
	T_6		R_0	18	175,1	1,655								0,0440				
			R_1		165,7	2,178	1,316	18			-	1,000	0,0434	0,986				
			R_3		171,9	1,814	1,096	18			-	1,000	0,0359	0,816				
	T_7		R_0	16	203,6	0,778								0,0494				
			R_1		191,8	1,048	1,346	16			-	1,000	0,0487	0,985				
			R_3		199,6	0,859	1,103	16			-	1,000	0,0397	0,803				
	MD_C		T_5	R_0	22	97,3	9,00	6 000								0,0295		
				R_1		94,2					15,005						0,0295	
				R_3		96,0					17,693	1,179	22	-	1,000	0,0293	0,992	
		T_6	R_0	18	130,2	3,503								0,0373				
			R_1		125,4	4,235			1,209	18	-	1,000	0,0369	0,991				
			R_3		128,2	3,789			1,082	18	-	1,000	0,0312	0,839				
T_7		R_0	16	152,6	1,586								0,0423					
		R_1		146,4	1,948	1,229			16	-	1,000	0,0419	0,990					
		R_3		150,0	1,727	1,089			16	-	1,000	0,0349	0,827					

Quadro A.5: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 2 e classe de plataforma F_1 .

Tipo 2												
Teste		e_U [cm]	ϵ_t ($\times 10^{-6}$)	V_b	E_m [MPa]	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ϵ_t ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_H ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR
F_1	MD_A	T_5	R_0	25	9,00	3 000						146,5
			R_1									138,4
			R_2									142,7
			R_3									143,5
		T_6	R_0	20								202,2
			R_1									189,3
			R_2									196,5
			R_3									197,7
		T_7	R_0	17								249,5
			R_1									231,9
			R_2									241,8
			R_3									243,7
	MD_B	T_5	R_0	25	117,9							
			R_1		112,8							
			R_2		115,3							
			R_3		115,7							
		T_6	R_0	20	164,7							
			R_1		156,5							
			R_2		160,5							
			R_3		161,3							
		T_7	R_0	17	205,0							
			R_1		193,7							
			R_2		199,3							
			R_3		200,4							
MD_C	T_5	R_0	25	85,5								
		R_1		83,0								
		R_2		84,0								
		R_3		84,2								
	T_6	R_0	20	121,4								
		R_1		117,2								
		R_2		118,9								
		R_3		119,2								
	T_7	R_0	17	153,0								
		R_1		147,1								
		R_2		149,5								
		R_3		149,9								

Quadro A.6: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 2 e classe de plataforma F_2 .

Tipo 2													
Teste		e_U [cm]	ε_t ($\times 10^{-6}$)	V_b	E_m [MPa]	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ε_t ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_H ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR	
F_2	MD_A	T_5	R_0	20	9,00	3 000					158,9	0,0430	
			R_1								149,1	0,986	
			R_2								155,4	0,934	
			R_3								156,5	0,818	
		T_6	R_0	15							218,0	0,0534	
			R_1								202,0	0,986	
			R_2								212,5	0,928	
			R_3								214,5	0,792	
		T_7	R_0	13							248,0	0,0585	
			R_1								228,4	0,985	
			R_2								241,4	0,925	
			R_3								244,1	0,790	
	MD_B	T_5	R_0	20	9,00	4 000						132,8	0,0395
			R_1									126,3	0,988
			R_2									130,2	0,938
			R_3									130,9	0,827
		T_6	R_0	15								185,5	0,0501
			R_1									174,7	0,987
			R_2									181,2	0,932
			R_3									182,6	0,801
		T_7	R_0	13								213,4	0,0554
			R_1									199,9	0,987
			R_2									208,1	0,929
			R_3									210,0	0,788
MD_C	T_5	R_0	20	9,00	6 000						101,1	0,0343	
		R_1									97,7	0,991	
		R_2									99,4	0,945	
		R_3									99,8	0,840	
	T_6	R_0	15								144,7	0,0451	
		R_1									138,7	0,990	
		R_2									141,8	0,937	
		R_3									142,5	0,815	
	T_7	R_0	13								168,9	0,0506	
		R_1									161,2	0,989	
		R_2									165,2	0,934	
		R_3									166,2	0,801	

Quadro A.7: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 3 e classe de plataforma F_1 .

Tipo 3														
Teste		e_U [cm]	ε_t ($\times 10^{-6}$)	V_b	E_m [MPa]	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ε_t ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_H ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR		
F_1	MD_A	T_5	R_0	161,0	9,00	3 000	4,225				0,0554			
			R_1	151,6			5,707	1,351	23	-	1,000	0,0544	0,983	
			R_2	157,5			4,711	1,115	23	-	1,000	0,0500	0,903	
			R_3	158,3			4,590	1,086	23	-	1,000	0,0423	0,765	
		T_6	R_0	209,2			1,140						0,0674	
			R_1	195,4			1,602	1,406	19	-	1,000	0,0663	0,984	
			R_2	204,3			1,282	1,125	19	-	1,000	0,0606	0,900	
			R_3	205,7			1,241	1,089	19	-	1,000	0,0510	0,757	
		T_7	R_0	240,5			0,568						0,0744	
			R_1	223,5			0,819	1,442	16	239,5	0,941	0,0732	0,984	
			R_2	234,6			0,643	1,131	17	-	1,000	0,0668	0,898	
			R_3	236,4			0,619	1,089	17	-	1,000	0,0563	0,757	
	MD_B	T_5	R_0	130,5	9,00	4 000	7,179					0,0492		
			R_1	124,6			9,053	1,261	23	-	1,000	0,0485	0,986	
			R_2	128,0			7,915	1,103	23	-	1,000	0,0447	0,908	
			R_3	128,5			7,768	1,082	23	-	1,000	0,0374	0,760	
		T_6	R_0	171,3			1,845						0,0613	
			R_1	162,5			2,402	1,301	19	-	1,000	0,0604	0,986	
			R_2	167,6			2,055	1,114	19	-	1,000	0,0554	0,904	
			R_3	168,5			2,005	1,087	19	-	1,000	0,0459	0,749	
		T_7	R_0	198,1			0,893						0,0685	
			R_1	187,1			1,186	1,328	17	-	1,000	0,0675	0,986	
			R_2	193,6			1,000	1,120	17	-	1,000	0,0617	0,902	
			R_3	194,7			0,972	1,088	17	-	1,000	0,0511	0,746	
MD_C	T_5	R_0	95,7	9,00	6 000	16,353					0,0406			
		R_1	92,7			19,195	1,174	23	-	1,000	0,0402	0,989		
		R_2	94,1			17,745	1,085	23	-	1,000	0,0372	0,915		
		R_3	94,3			17,560	1,074	23	-	1,000	0,0307	0,755		
	T_6	R_0	127,3			3,921						0,0525		
		R_1	122,8			4,706	1,200	19	-	1,000	0,0519	0,989		
		R_2	125,0			4,302	1,097	19	-	1,000	0,0478	0,911		
		R_3	125,3			4,241	1,082	19	-	1,000	0,0388	0,739		
	T_7	R_0	148,4			1,820						0,0597		
		R_1	142,7			2,217	1,218	17	-	1,000	0,0590	0,989		
		R_2	145,5			2,010	1,104	17	-	1,000	0,0542	0,908		
		R_3	146,0			1,975	1,085	17	-	1,000	0,0438	0,734		

Quadro A.8: Valores obtidos para o critério de fadiga com um pavimento do tipo 3 e classe de plataforma F_2 .

Tipo 3														
Teste		e_U [cm]	ε_t ($\times 10^{-6}$)	V_b	E_m [MPa]	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ε_t ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_H ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR		
F_2	MD_A	T_5	R_0	162,4	9,00	3 000	4,041				0,0404			
			R_1	152,1			5,619	1,390	19	-	1,000	0,0399	0,988	
			R_2	159,8			4,388	1,086	19	-	1,000	0,0379	0,940	
			R_3	160,8			4,253	1,053	19	-	1,000	0,0332	0,821	
		T_6	R_0	208,6			1,155						0,0471	
			R_1	193,4			1,689	1,462	15	-	1,000	0,0465	0,988	
			R_2	205,0			1,261	1,092	15	-	1,000	0,0441	0,937	
			R_3	206,6			1,213	1,050	15	-	1,000	0,0390	0,828	
		T_7	R_0	236,9			0,612						0,0508	
			R_1	218,1			0,925	1,511	13	-	1,000	0,0502	0,988	
			R_2	232,6			0,671	1,096	13	-	1,000	0,0476	0,936	
			R_3	234,7			0,642	1,048	13	-	1,000	0,0425	0,837	
	MD_B	T_5	R_0	136,4		5,771						0,0377		
			R_1	129,5		7,463	1,293	19	-	1,000	0,0373	0,989		
			R_2	134,3		6,232	1,080	19	-	1,000	0,0355	0,942		
			R_3	135,0		6,077	1,053	19	-	1,000	0,0311	0,823		
		T_6	R_0	177,8		1,533						0,0447		
			R_1	167,5		2,067	1,348	15	-	1,000	0,0442	0,989		
			R_2	174,8		1,667	1,087	15	-	1,000	0,0420	0,939		
			R_3	176,0		1,613	1,052	15	-	1,000	0,0365	0,816		
		T_7	R_0	204,0		0,770						0,0487		
			R_1	191,1		1,068	1,386	13	-	1,000	0,0482	0,989		
			R_2	200,4		0,841	1,092	13	-	1,000	0,0457	0,938		
			R_3	202,0		0,810	1,051	13	-	1,000	0,0401	0,823		
MD_C	T_5	R_0	104,6	10,473						0,0337				
		R_1	100,9	12,538	1,197	19	-	1,000	0,0334	0,991				
		R_2	103,2	11,214	1,071	19	-	1,000	0,0319	0,946				
		R_3	103,5	11,022	1,052	19	-	1,000	0,0281	0,833				
	T_6	R_0	139,0	2,525						0,0411				
		R_1	133,3	3,117	1,235	15	-	1,000	0,0407	0,991				
		R_2	136,9	2,725	1,080	15	-	1,000	0,0387	0,943				
		R_3	137,6	2,660	1,054	15	-	1,000	0,0335	0,816				
	T_7	R_0	161,8	1,183						0,0454				
		R_1	154,4	1,493	1,262	13	-	1,000	0,0450	0,990				
		R_2	159,2	1,284	1,085	13	-	1,000	0,0427	0,941				
		R_3	160,1	1,246	1,053	13	-	1,000	0,0366	0,806				

Quadro A.9: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 1 e classe de plataforma F_2 .

Tipo 1												
Teste		e_U [cm]	ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_V ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR		
F_2	MD_A	T_5	R_0		-385,8	4,738				-0,358		
			R_1	22	-378,1	5,136	1,084	22	-	1,000	-0,353	0,985
			R_3		-341,8	7,691	1,623	21	-364,5	0,955	-0,351	0,979
		T_6	R_0		-511,7	1,531					-0,436	
			R_1	18	-500,0	1,679	1,097	18	-	1,000	-0,429	0,983
			R_3		-448,1	2,603	1,700	17	-482,5	0,944	-0,426	0,975
		T_7	R_0		-599,2	0,814					-0,487	
			R_1	16	-584,4	0,900	1,105	16	-	1,000	-0,478	0,981
			R_3		-521,1	1,424	1,749	15	-564,5	0,938	-0,474	0,973
	MD_B	T_5	R_0		-332,4	8,596					-0,319	
			R_1	22	-326,8	9,205	1,071	22	-	1,000	-0,315	0,988
			R_3		-297,0	13,491	1,569	21	-317,6	0,955	-0,313	0,981
		T_6	R_0		-446,0	2,652					-0,393	
			R_1	18	-437,3	2,871	1,083	18	-	1,000	-0,388	0,986
			R_3		-394,0	4,355	1,642	17	-425,7	0,944	-0,384	0,977
		T_7	R_0		-526,0	1,371					-0,442	
			R_1	16	-514,8	1,495	1,090	16	-	1,000	-0,435	0,984
			R_3		-461,4	2,317	1,689	15	-501,7	0,938	-0,431	0,975
	MD_C	T_5	R_0		-266,4	20,847					-0,270	
			R_1	22	-262,9	21,980	1,054	22	-	1,000	-0,267	0,991
			R_3		-240,7	31,257	1,499	21	-258,4	0,955	-0,265	0,984
T_6		R_0		-363,3	6,029					-0,338		
		R_1	18	-357,7	6,414	1,064	18	-	1,000	-0,334	0,989	
		R_3		-324,8	9,437	1,565	17	-352,5	0,944	-0,331	0,980	
T_7		R_0		-432,5	3,001					-0,383		
		R_1	16	-425,2	3,211	1,070	16	-	1,000	-0,378	0,988	
		R_3		-384,0	4,829	1,609	15	-419,8	0,938	-0,375	0,978	

Quadro A.10: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 2 e classe de plataforma F_1 .

Tipo 2												
Teste			e_U [cm]	ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_V ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR	
F_1	MD_A	T_5	R_0	25	-378,4	5,120				-0,435		
			R_1		-371,4	5,517	1,078	25	-	1,000	-0,429	0,986
			R_2		-363,2	6,033	1,178	25	-	1,000	-0,424	0,976
			R_3		-320,8	9,918	1,937	23	-360,8	0,920	-0,422	0,971
		T_6	R_0	20	-523,5	1,398					-0,551	
			R_1		-512,4	1,523	1,089	20	-	1,000	-0,542	0,984
			R_2		-500,7	1,670	1,194	20	-	1,000	-0,535	0,970
			R_3		-435,6	2,917	2,087	18	-498,3	0,900	-0,531	0,964
		T_7	R_0	17	-651,5	0,583					-0,647	
			R_1		-636,5	0,640	1,098	17	-	1,000	-0,636	0,982
			R_2		-621,9	0,702	1,204	17	-	1,000	-0,626	0,967
			R_3		-534,7	1,284	2,204	15	-619,7	0,882	-0,621	0,960
F_1	MD_B	T_5	R_0	25	-325,1	9,394				-0,385		
			R_1		-320,0	10,011	1,066	25	-	1,000	-0,381	0,988
			R_2		-313,3	10,902	1,160	25	-	1,000	-0,377	0,979
			R_3		-278,8	17,384	1,850	23	-315,3	0,920	-0,376	0,975
		T_6	R_0	20	-457,0	2,407					-0,495	
			R_1		-448,6	2,592	1,077	20	-	1,000	-0,488	0,986
			R_2		-438,5	2,838	1,179	20	-	1,000	-0,482	0,974
			R_3		-384,5	4,805	1,996	18	-443,2	0,900	-0,479	0,967
		T_7	R_0	17	-575,4	0,958					-0,587	
			R_1		-563,8	1,039	1,085	17	-	1,000	-0,578	0,985
			R_2		-550,8	1,140	1,191	17	-	1,000	-0,569	0,970
			R_3		-477,4	2,021	2,111	15	-558,0	0,882	-0,565	0,962
F_1	MD_C	T_5	R_0	25	-259,2	23,243				-0,324		
			R_1		-256,1	24,406	1,050	25	-	1,000	-0,321	0,991
			R_2		-251,2	26,384	1,135	25	-	1,000	-0,319	0,984
			R_3		-225,9	40,310	1,734	24	-240,9	0,960	-0,317	0,980
		T_6	R_0	20	-372,0	5,482					-0,422	
			R_1		-366,6	5,811	1,060	20	-	1,000	-0,417	0,989
			R_2		-358,7	6,339	1,156	20	-	1,000	-0,413	0,978
			R_3		-318,0	10,270	1,873	18	-370,4	0,900	-0,410	0,972
		T_7	R_0	17	-476,2	2,042					-0,507	
			R_1		-468,5	2,179	1,067	17	-	1,000	-0,501	0,988
			R_2		-457,9	2,389	1,170	17	-	1,000	-0,494	0,974
			R_3		-401,3	4,049	1,983	15	-474,9	0,882	-0,490	0,967

Quadro A.11: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 2 e classe de plataforma F_2 .

Tipo 2												
Teste		e_U [cm]	ε_c ($\times 10^{-6}$)	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ε_c ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_V ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR		
F_2	MD_A	T_5	R_0	20	-350,7	6,939				-0,350		
			R_1		-344,5	7,452	1,074	20	-	1,000	-0,345	0,986
			R_2		-340,8	7,787	1,122	20	-	1,000	-0,343	0,979
			R_3		-308,5	11,593	1,671	19	-327,3	0,950	-0,342	0,975
		T_6	R_0	15	-486,9	1,868					-0,444	
			R_1		-477,1	2,027	1,085	15	-	1,000	-0,437	0,984
			R_2		-472,4	2,108	1,128	15	-	1,000	-0,433	0,976
			R_3		-421,6	3,323	1,779	13	-483,9	0,867	-0,432	0,972
		T_7	R_0	13	-563,1	1,044					-0,495	
			R_1		-551,1	1,138	1,090	13	-	1,000	-0,486	0,983
			R_2		-546,1	1,180	1,130	13	-	1,000	-0,482	0,974
			R_3		-483,9	1,915	1,834	11	-559,8	0,846	-0,480	0,970
	MD_B	T_5	R_0	20	-312,5	11,014					-0,318	
			R_1		-307,4	11,752	1,067	20	-	1,000	-0,314	0,988
			R_2		-304,1	12,279	1,115	20	-	1,000	-0,312	0,981
			R_3		-276,8	17,895	1,625	19	-294,6	0,950	-0,310	0,977
		T_6	R_0	15	-442,6	2,737					-0,410	
			R_1		-434,2	2,952	1,079	15	-	1,000	-0,404	0,986
			R_2		-429,8	3,076	1,124	15	-	1,000	-0,401	0,977
			R_3		-385,6	4,746	1,734	14	-414,6	0,933	-0,399	0,973
T_7		R_0	13	-516,9	1,471					-0,460		
		R_1		-506,5	1,595	1,084	13	-	1,000	-0,453	0,985	
		R_2		-501,6	1,658	1,127	13	-	1,000	-0,449	0,975	
		R_3		-446,8	2,635	1,791	12	-482,5	0,923	-0,447	0,971	
MD_C	T_5	R_0	20	-261,7	22,365					-0,275		
		R_1		-258,2	23,615	1,056	20	-	1,000	-0,273	0,990	
		R_2		-255,4	24,676	1,103	20	-	1,000	-0,271	0,983	
		R_3		-234,2	34,898	1,560	19	-250,6	0,950	-0,270	0,979	
	T_6	R_0	15	-381,5	4,954					-0,364		
		R_1		-375,4	5,288	1,067	15	-	1,000	-0,359	0,988	
		R_2		-371,3	5,523	1,115	15	-	1,000	-0,356	0,979	
		R_3		-335,7	8,266	1,669	14	-363,3	0,933	-0,354	0,974	
	T_7	R_0	13	-452,0	2,515					-0,412		
		R_1		-444,0	2,700	1,073	13	-	1,000	-0,407	0,987	
		R_2		-439,4	2,817	1,120	13	-	1,000	-0,403	0,977	
		R_3		-394,3	4,344	1,727	12	-429,1	0,923	-0,401	0,972	

Quadro A.12: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 3 e classe de plataforma F_1 .

Tipo 3												
Teste		e_U [cm]	ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_V ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR		
F_1	MD_A	T_5	R_0	23	-364,0	5,983				-0,457		
			R_1		-357,4	6,432	1,075	23	-	1,000	-0,451	0,986
			R_2		-351,2	6,900	1,153	23	-	1,000	-0,446	0,975
			R_3		-307,0	11,822	1,976	21	-344,1	0,913	-0,444	0,971
		T_6	R_0	19	-467,0	2,207					-0,552	
			R_1		-457,8	2,390	1,083	19	-	1,000	-0,543	0,984
			R_2		-449,9	2,562	1,161	19	-	1,000	-0,536	0,971
			R_3		-387,9	4,638	2,101	17	-439,8	0,895	-0,533	0,966
		T_7	R_0	17	-534,2	1,289					-0,612	
			R_1		-523,2	1,401	1,087	17	-	1,000	-0,602	0,983
			R_2		-514,4	1,500	1,163	17	-	1,000	-0,593	0,969
			R_3		-439,8	2,805	2,176	15	-502,0	0,882	-0,590	0,964
F_1	MD_B	T_5	R_0	23	-319,3	10,101				-0,410		
			R_1		-314,3	10,759	1,065	23	-	1,000	-0,405	0,988
			R_2		-308,8	11,537	1,142	23	-	1,000	-0,400	0,978
			R_3		-272,1	19,163	1,897	21	-307,0	0,913	-0,399	0,974
		T_6	R_0	19	-415,7	3,516					-0,500	
			R_1		-408,4	3,772	1,073	19	-	1,000	-0,493	0,986
			R_2		-401,2	4,053	1,153	19	-	1,000	-0,486	0,973
			R_3		-348,5	7,113	2,023	17	-398,4	0,895	-0,484	0,968
		T_7	R_0	17	-479,5	1,986					-0,558	
			R_1		-470,7	2,139	1,077	17	-	1,000	-0,550	0,986
			R_2		-462,3	2,298	1,157	17	-	1,000	-0,542	0,971
			R_3		-398,4	4,167	2,098	15	-458,7	0,882	-0,538	0,965
F_1	MD_C	T_5	R_0	23	-261,7	22,392				-0,348		
			R_1		-258,4	23,548	1,052	23	-	1,000	-0,345	0,991
			R_2		-254,1	25,174	1,124	23	-	1,000	-0,342	0,982
			R_3		-226,3	40,018	1,787	21	-257,6	0,913	-0,341	0,978
		T_6	R_0	19	-347,5	7,195					-0,431	
			R_1		-342,6	7,619	1,059	19	-	1,000	-0,427	0,989
			R_2		-336,4	8,193	1,139	19	-	1,000	-0,421	0,977
			R_3		-295,5	13,759	1,912	17	-341,7	0,895	-0,419	0,972
		T_7	R_0	17	-405,8	3,873					-0,485	
			R_1		-399,6	4,117	1,063	17	-	1,000	-0,480	0,989
			R_2		-392,2	4,435	1,145	17	-	1,000	-0,473	0,975
			R_3		-341,7	7,698	1,988	15	-398,5	0,882	-0,470	0,969

Quadro A.13: Valores obtidos para o critério de deformação permanente com um pavimento do tipo 3 e classe de plataforma F_2 .

Tipo 3												
Teste		e_U [cm]	ε_c ($\times 10^{-6}$)	N ($\times 10^6$)	TBR	e_R [cm]	ε_c ($\times 10^{-6}$)	BLR	Δ_V ($\times 10^{-3}$) [m]	SDR		
F_2	MD_A	T_5	R_0	19	-298,4	13,233				-0,345		
			R_1		-293,6	14,118	1,067	19	-	1,000	-0,340	0,987
			R_2		-291,8	14,484	1,095	19	-	1,000	-0,338	0,980
			R_3		-263,3	21,848	1,651	17	-293,9	0,895	-0,337	0,978
		T_6	R_0	15	-377,9	5,149					-0,414	
			R_1		-371,3	5,525	1,073	15	-	1,000	-0,408	0,985
			R_2		-369,5	5,632	1,094	15	-	1,000	-0,405	0,978
			R_3		-329,6	8,892	1,727	13	-371,6	0,867	-0,404	0,976
		T_7	R_0	13	-428,7	3,107					-0,459	
			R_1		-421,0	3,343	1,076	13	-	1,000	-0,451	0,984
			R_2		-419,4	3,394	1,092	13	-	1,000	-0,448	0,977
			R_3		-371,6	5,506	1,772	11	-420,9	0,846	-0,447	0,975
	MD_B	T_5	R_0	19	-271,1	19,429					-0,315	
			R_1		-267,0	20,642	1,062	19	-	1,000	-0,311	0,988
			R_2		-265,2	21,221	1,092	19	-	1,000	-0,309	0,981
			R_3		-240,5	31,372	1,615	18	-254,9	0,947	-0,308	0,978
		T_6	R_0	15	-348,9	7,085					-0,383	
			R_1		-343,1	7,576	1,069	15	-	1,000	-0,378	0,987
			R_2		-341,2	7,747	1,094	15	-	1,000	-0,375	0,979
			R_3		-305,9	11,993	1,693	13	-347,9	0,867	-0,374	0,976
		T_7	R_0	13	-399,6	4,118					-0,428	
			R_1		-392,6	4,418	1,073	13	-	1,000	-0,421	0,985
			R_2		-390,8	4,501	1,093	13	-	1,000	-0,418	0,978
			R_3		-347,9	7,167	1,740	11	-397,9	0,846	-0,417	0,975
MD_C	T_5	R_0	19	-233,5	35,317					-0,276		
		R_1		-230,4	37,228	1,054	19	-	1,000	-0,273	0,990	
		R_2		-228,7	38,390	1,087	19	-	1,000	-0,271	0,983	
		R_3		-208,9	55,151	1,562	18	-222,6	0,947	-0,270	0,980	
	T_6	R_0	15	-307,8	11,700					-0,342		
		R_1		-303,2	12,420	1,061	15	-	1,000	-0,338	0,989	
		R_2		-301,1	12,765	1,091	15	-	1,000	-0,335	0,981	
		R_3		-271,9	19,209	1,642	14	-291,7	0,933	-0,334	0,977	
	T_7	R_0	13	-357,4	6,432					-0,385		
		R_1		-351,8	6,855	1,066	13	-	1,000	-0,380	0,988	
		R_2		-349,6	7,024	1,092	13	-	1,000	-0,377	0,979	
		R_3		-313,4	10,879	1,692	12	-337,4	0,923	-0,376	0,976	

Anexo D

Quadro A.14: Valores obtidos para o critério de fadiga para diferentes geossintéticos.

Geossintético	Rigidez	E [MPa]	Teste	e_U [cm]	$\varepsilon_t (\times 10^{-6})$	V_b	E_m [MPa]	$N (\times 10^6)$	TBR	e_R [cm]	$\varepsilon_t (\times 10^{-6})$	BLR	$\Delta_H (\times 10^{-3})$	SDR	
Sem reforço				R_0	249,5			0,472					0,0806		
Geogrelha	Alta	4 230	$2 F_1 MD_A T_7$	R_1	231,9	17	9,0	3 000	0,681	1,443	16	248,8	0,941	0,0791	0,981
				R_2	241,8				0,553	1,172	17	-	1,000	0,0718	0,890
				R_3	243,7				0,531	1,126	17	-	1,000	0,0583	0,723
	Média	1 970		R_1	240,6				0,567	1,200	17	-	1,000	0,0799	0,991
				R_2	245,2				0,515	1,092	17	-	1,000	0,0762	0,945
				R_3	246,1				0,506	1,071	17	-	1,000	0,0674	0,836
	Baixa	35		R_1	251,7				0,452	0,958	17	-	1,000	0,0802	0,995
				R_2	249,6				0,471	0,998	17	-	1,000	0,0803	0,996
				R_3	249,5				0,472	1,001	17	-	1,000	0,0805	0,999
Geotêxtil	Alta	3 150	R_1	236,0	0,624	1,323	17	-	1,000	0,0795	0,986				
			R_2	243,3	0,536	1,136	17	-	1,000	0,0737	0,915				
			R_3	244,7	0,520	1,102	17	-	1,000	0,0615	0,762				
	Média	1 575	R_1	242,2	0,548	1,161	17	-	1,000	0,0801	0,993				
			R_2	245,9	0,508	1,076	17	-	1,000	0,0770	0,956				
			R_3	246,7	0,500	1,059	17	-	1,000	0,0697	0,865				
	Baixa	42	R_1	251,1	0,457	0,968	17	-	1,000	0,0803	0,996				
			R_2	249,6	0,472	1,000	17	-	1,000	0,0804	0,997				
			R_3	249,5	0,473	1,001	17	-	1,000	0,0805	0,998				

Quadro A.15: Valores obtidos para o critério de deformação permanente para diferentes geossintéticos.

<i>Geossintético</i>	<i>Rigidez</i>	<i>E [MPa]</i>	<i>Teste</i>	e_U [cm]	$\epsilon_c (\times 10^{-6})$	$N (\times 10^6)$	<i>TBR</i>	e_R [cm]	$\epsilon_c (\times 10^{-6})$	<i>BLR</i>	$\Delta_V (\times 10^{-3})$	<i>SDR</i>	
Sem reforço			$2 F_1 MD_A T_7$	R_0	17	-651,5	0,5828					-0,647	
Geogrelha	Alta	4 230		R_1	17	-636,5	0,6397	1,098	17	-	1,000	-0,636	0,977
				R_2	17	-621,9	0,7019	1,204	17	-	1,000	-0,626	0,955
				R_3	15	-534,7	1,2843	2,204	15	-619,7	0,882	-0,621	0,821
	Média	1 970		R_1	17	-642,1	0,6176	1,060	17	-	1,000	-0,641	0,986
				R_2	17	-635,6	0,6430	1,103	17	-	1,000	-0,636	0,976
				R_3	16	-581,2	0,9198	1,578	16	-610,1	0,941	-0,633	0,892
	Baixa	35		R_1	17	-651,2	0,5837	1,002	17	-	1,000	-0,648	1,000
				R_2	17	-647,7	0,5965	1,024	17	-	1,000	-0,647	0,994
				R_3	17	-648,0	0,5953	1,022	17	-	1,000	-0,647	0,995
Geotêxtil	Alta	3 150		R_1	17	-639,1	0,6292	1,080	17	-	1,000	-0,638	0,981
				R_2	17	-628,2	0,6742	1,157	17	-	1,000	-0,630	0,964
				R_3	15	-554,1	1,1133	1,910	15	-643,1	0,882	-0,626	0,851
	Média	1 575		R_1	17	-643,1	0,6137	1,053	17	-	1,000	-0,641	0,987
				R_2	17	-638,3	0,6324	1,085	17	-	1,000	-0,637	0,980
				R_3	16	-592,2	0,8534	1,464	16	-620,9	0,941	-0,635	0,909
	Baixa	42		R_1	17	-650,6	0,5860	1,006	17	-	1,000	-0,648	0,999
				R_2	17	-647,9	0,5958	1,022	17	-	1,000	-0,647	0,994
			R_3	17	-648,2	0,5946	1,020	17	-	1,000	-0,647	0,995	

Anexo E

Quadro A.16: Valores obtidos para o critério de fadiga para o modelo CamClay.

Geossintético	Rigidez	E [MPa]	Teste		e_U [cm]	$\varepsilon_t (\times 10^{-6})$	$\varepsilon_{t\text{ CamClay}} (\times 10^{-6})$	V_b	E_m [MPa]	$N (\times 10^6)$	$N_{\text{CamClay}} (\times 10^6)$	TBR	TBR_{CamClay}	
Geogrelha	Alta	4 230	$2 F_2 MD_A$	T_5	R_0	20	158,9	160,6	9,00	3 000	4,502	4,272		
					R_1		149,1	150,7			6,195	5,875	1,376	1,375
					R_2		155,4	157,0			5,032	4,792	1,118	1,122
					R_3		156,5	157,9			4,862	4,650	1,080	1,089
				T_7	R_0	13	248,0	250,0			0,487	0,467		
					R_1		228,4	230,2			0,735	0,706	1,512	1,511
					R_2		241,4	243,2			0,557	0,537	1,144	1,148
					R_3		244,1	245,6			0,527	0,511	1,084	1,093

Quadro A.17: Valores obtidos para o critério de deformação permanente para o modelo CamClay.

Geossintético	Rigidez	E [MPa]	Teste		e_U [cm]	$\varepsilon_c (\times 10^{-6})$	$\varepsilon_{c\text{ CamClay}} (\times 10^{-6})$	$N (\times 10^6)$	$N_{\text{CamClay}} (\times 10^6)$	TBR	TBR_{CamClay}	
Geogrelha	Alta	4 230	$2 F_2 MD_A$	T_5	R_0	20	-350,7	-398,0	6,9392	4,1849		
					R_1		-344,5	-391,0	7,4523	4,4909	1,074	1,073
					R_2		-340,8	-388,4	7,7865	4,6147	1,122	1,103
					R_3		-308,5	-356,7	11,5931	6,4865	1,671	1,550
				T_7	R_0	13	-563,1	-637,7	1,0440	0,6349		
					R_1		-551,1	-624,2	1,1379	0,6913	1,090	1,089
					R_2		-546,1	-621,1	1,1801	0,7052	1,130	1,111
					R_3		-483,9	-559,8	1,9151	1,0692	1,834	1,684