

Fatores de erro no processo de dimensionamento de pavimentos flexíveis

Júlio Moisés Gândara Fernandes

Relatório Final de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Junho de 2023

Fatores de erro no processo de dimensionamento de pavimentos flexíveis

Júlio Moisés Gândara Fernandes

Relatório Final de Projeto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientadores:

Manuel Joaquim da Costa Minhoto

António Manuel Prada Oliveira

Junho de 2023

Desejo expressar a todas as pessoas e entidades, que contribuíram, de alguma forma, para a realização do presente trabalho, os mais sinceros agradecimentos, em especial:

Ao orientador Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto, pela disponibilidade e incentivo na conclusão deste trabalho, pela dedicação na orientação da componente científica, pela bibliografia disponibilizada e partilha de conhecimentos, pelos aspetos a melhorar e por fim pela sua cordialidade e celeridade no estabelecimento dos contactos e procedimentos necessários à submissão e aprovação do tema;

Ao orientador Doutor António Manuel Prada Oliveira, pela disponibilidade e empenho na orientação da componente prática, pela disponibilização dos relatórios de qualidade afetos à beneficiação do troço em estudo, junto das Estradas de Portugal – Direção de Bragança, atualmente designadas por Infraestruturas de Portugal;

Ao Professor Doutor Jorge C. Pais, pela disponibilização do Programa JPav1.1, para a determinação das extensões na verificação estrutural do pavimento;

A todos os meus professores, quer do Curso de Licenciatura em Engenharia Civil quer do Curso de Mestrado em Engenharia da Construção, pela sua transmissão de conhecimentos e experiências, tendo-me ajudado a crescer academicamente e profissionalmente;

Ao meu Professor de Francês João Cabrita, tendo-nos reencontramos, pela disponibilidade, consideração e dedicação prestada na revisão do texto original;

Aos meus colegas de Licenciatura e Mestrado, pelo companheirismo e interajuda nos desafios que nos foram surgindo ao longo desta caminhada;

À minha família, pelo apoio incondicional, ajuda e compreensão que sempre manifestaram;

Aos meus filhos, uma palavra de amor e carinho muito especial pelo tempo que não lhes pude dedicar.

Fatores de erro no processo de dimensionamento de pavimentos flexíveis

RESUMO

A qualidade de um pavimento rodoviário é garantida em duas fases distintas da sua concepção, primeiramente na fase de projeto, exigindo um adequado dimensionamento estrutural, requerendo o conhecimento das características mecânicas dos materiais das camadas que constituem o pavimento e da sua fundação e, por fim, durante a sua execução em obra, pela qualidade dos processos construtivos e materiais empregues, sendo conveniente verificar os valores adotados no projeto e realizar eventuais adaptações na estrutura do pavimento em função dos resultados obtidos.

É com frequência que se veem pavimentos rodoviários, recentes, logo durante os primeiros anos de utilização, com grandes extensões degradadas, resultando numa redução prematura da sua qualidade. A qualidade de construção tem uma influência determinante na vida residual dos pavimentos, além disso, o conhecimento dos dados de projeto e adoção, cada vez mais, de métodos empírico mecanicistas permitem apoiar o estudo da evolução do desempenho dos pavimentos de uma forma mais fiável.

O presente trabalho pretende avaliar a variabilidade dos fatores de obra e a sua influência no comportamento estrutural dum pavimento flexível. Trata-se de um estudo que considera um pavimento real, tendo considerado os dados recolhidos durante as obras de beneficiação da E.N. 221 entre o Km 56+200 e o Km 79+100. Nele são determinados os estados de tensão e extensão nas camadas betuminosas, resultantes da variabilidade dos fatores de obra: percentagem de betume, percentagem de *filler*, grau de compactação e espessura das camadas betuminosas.

Palavras-chave: Pavimentos flexíveis, deformação permanente, dimensionamento de pavimentos flexíveis, percentagem de betume, módulo de deformabilidade, eixo padrão.

Error factors in the flexible pavement design process

ABSTRACT

The quality of a road pavement is guaranteed in two distinct phases of its design, firstly in the design phase, requiring an adequate structural design, requiring knowledge of the mechanical characteristics of the materials of the layers that make up the pavement and its foundation, and finally during its execution on site, due to the quality of the construction processes and materials used, making it convenient to verify the values adopted in the project and make possible adaptations to the pavement structure according to the results obtained.

Recent road pavements are often seen during the first years of use, with large areas degraded, resulting in a premature reduction of their quality. The quality of construction has a decisive influence on the residual life of pavements, in addition, the knowledge of design data and the adoption, increasingly, of mechanistic empirical methods allow us to support the study of the evolution of pavement performance in a more reliable way.

The present work intends to evaluate the variability of construction factors and their influence on the structural behavior of a flexible pavement. This is a study that considers a real pavement, having considered the data collected during the improvement works of E.N. 221 between Km 56+200 and Km 79+100. It determines the states of tension and extension in the bituminous layers, resulting from the variability of the work factors: bitumen percentage, filler percentage, degree of compaction and thickness of the bituminous layers.

Keywords: Flexible pavements, permanent deformation, design of flexible pavements, bitumen percentage, modulus of deformability, standard axis.

Índice Geral

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento temático	1
1.2	Objetivos do estudo e metodologia	3
1.3	Organização do trabalho.....	3
2.	PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Pavimentos Flexíveis.....	8
3.	DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	15
3.1	Introdução.....	15
3.2	Famílias e Tipos de Degradações de Pavimentos Flexíveis.....	16
3.3	Deformações.....	19
3.4	Fendilhamento	21
3.5	Desagregação da camada de desgaste	24
3.6	Movimento de Materiais	26
3.7	Reparações	27
4.	DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	28
4.1	Introdução.....	28
4.2	Métodos Empíricos	29
4.3	Métodos Empírico-mecanicistas	32
4.3.1	Princípios do dimensionamento empírico-mecanicista.....	32
4.3.2	Solicitações.....	36
4.3.2.1	Tráfego	36
4.3.2.2	Condições climáticas.....	40
4.3.3	Características Mecânicas dos Materiais.....	42
4.3.3.1	Solo de fundação	43
4.3.3.2	Camadas Granulares.....	44

4.3.3.3	Misturas betuminosas	45
4.3.4	Modelo de Comportamento Estrutural	49
4.3.4.1	Modelo Elástico Multicamada	50
4.3.5	Critérios de ruína	53
4.3.5.1	Fendilhamento por Fadiga	53
4.3.5.2	Deformação permanente	55
5.	VARIÁVEIS DE PROJETO E DE OBRA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	57
5.1	Introdução	57
5.2	Influência das variáveis de projeto	58
5.3	Influência das variáveis de obra	59
6.	ESTUDO DE CASO	61
6.1	Introdução	61
6.2	Premissas de Projeto	61
6.3	Parametrização das amostras recolhidas em obra e comparação de resultados	66
6.3.1	Metodologia de trabalho	66
6.3.2	Parametrização das amostras recolhidas em fase de obra (in situ)	69
6.3.3	Conclusões	95
6.4	Apresentação/levantamento das degradações	99
6.4.1	Conclusões	100
6.5	Caracterização estatística das variáveis em estudo	101
6.5.1	Caracterização estatística da percentagem de betume	103
6.5.2	Caracterização estatística da percentagem de filler	105
6.5.3	Caracterização estatística do grau de compactação (G.C)	107
6.5.4	Caracterização estatística da espessura da camada (hcamada)	109
6.5.5	Conclusões	113
7.	CONCLUSÕES FINAIS	115
7.1	Principais conclusões	115
7.2	Limitações	117

7.3 Desenvolvimentos futuros.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
ANEXOS.....	i
Anexo I - Elementos recolhidos dos boletins de amostragem efetuados durante as campanhas de controlo de qualidade in situ durante a execução do pavimento.	ii
Anexo II – Notas de cálculo geradas pelo programa JPav 1.1, desenvolvido pelo Prof. Jorge C. Pais, para cada “simulação” das amostras em estudo.....	iv
Anexo III – Representação gráfica do efeito independente provocada pela introdução isolada dos fatores analisados nas amostras em estudo.....	vi

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Pavimento rodoviário: constituição e ações (Branco et al, 2011).....	6
Figura 2.2 – Constituição de um pavimento flexível (LNEC, 2005).	9
Figura 2.3 – Constituição e comportamento de um pavimento flexível (Branco et al, 2011). 12	
Figura 2.4: Distribuição de tensões verticais nas várias camadas que constituem um pavimento flexível (adaptado de Alves, 2007; Interactive, 2008; Santos,2009).....	14
Figura 3.1 – Evolução das solicitações num pavimento rodoviário (Pereira e Miranda, 1999).	15
Figura 3.2 – Representação esquemática das rodeiras de pequeno raio causadas pelas deformações permanentes nas camadas betuminosas (adaptado de Maia, I.M., 2012 e de Santucci, L., 2001).	20
Figura 3.3 – Representação esquemática das rodeiras de grande raio causadas pelas deformações permanentes nas camadas granulares betuminosas (adaptado de Maia, I.M., 2012 e de Santucci, L., 2001).....	21
Figura 3.4 – Fendilhamento das camadas betuminosas (adaptado de Antunes, M., et al, 2005).	22
Figura 3.5 – Pavimento fendilhado (pele de crocodilo): estado de pré-ruína (Pereira, P.A., et al, 2003).....	23
Figura 3.6 – Desagregação superficial (Interactive, 2008).	24
Figura 3.7 – Formação de pelada (Interactive, 2008).	25
Figura 3.8 – Ninho ou cova (Pinto, J., 2003 e Figueiredo, N., 2011)	26
Figura 3.9 – Exsudação (Interactive, 2008).	26
Figura 3.10 – Tapagem de covas (Antunes et al, 2005).....	27
Figura 3.11 – Remendo (Interactive, 2007).	27

Figura 4.1 – Curvas originais para o projeto de pavimentos aeroportuários em função de CBR (Yodes e Witczak, 1975).....	30
Figura 4.2 – Organigrama do procedimento de dimensionamento analítico-empírico de um pavimento flexível (adaptado de Azevedo, 1993).....	34
Figura 4.3 – Configuração e esquematização geral adotada para a ação de um eixo-padrão sobre o pavimento (adaptado de Branco et al, 2011 e Oliveira, 2001)	37
Figura 4.4 – Esquema adotado para os valores das dimensões e das cargas utilizadas nos cálculos com o programa JPav1.1 desenvolvido pelo prof. Jorge C. Pais	38
Figura 4.5 – Curva dos fatores de ponderação da temperatura média mensal do ar, método da SHELL (adaptado de Picado-Santos, 1988).....	41
Figura 4.4 – Curva das temperaturas de serviço em misturas betuminosas, método da SHELL (adaptado de Picado-Santos, 1994).	42
Figura 4.7 – Ábaco de Van der Poel para determinação da rigidez do betume (adaptado de Picado-Santos, 1995, e de SHELL, 1977).....	46
Figura 4.8 – Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos nos pontos críticos de um pavimento flexível (adaptado de Franco, 2007).	50
Figura 4.9 – Modelo de Burmister (adaptado de Jacinto, 2003)	51
Figura 4.14 – Representação esquemática do ponto crítico onde ocorre a rotura por fadiga à tração (adaptado Minhoto, apontamentos aulas IT, 2014 - IPB)	54
Figura 4.15: Representação esquemática do critério de deformação permanente (apontamentos aulas IT, 2014 - IPB)	55
Figura 6.1 – Esquema estrutural do pavimento projetado.....	63
Figura 6.2 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 56+600 (faixa da direita)	72
Figura 6.3 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 62+200 (faixa da direita)	74

Figura 6.4 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 69+000 (faixa da direita)	76
Figura 6.5 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 70+500 (faixa da direita)	78
Figura 6.6 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 70+800 (faixa da direita)	80
Figura 6.7 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 72+500 (faixa da direita)	82
Figura 6.8 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 56+700 (faixa da esquerda)	84
Figura 6.9 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 61+800 (faixa da esquerda)	86
Figura 6.10 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 66+000 (faixa da esquerda)	88
Figura 6.11 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 72+700 (faixa da esquerda)	90
Figura 6.12 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 73+000 (faixa da esquerda)	92
Figura 6.13 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 75+000 (faixa da esquerda)	94
Figura 6.14 – Variação do N_{130} ao longo da estrada	96
Figura 6.15 – Variação do N_{130} ao longo da estrada (excluindo as amostras Km 56+600 D e 66+000 E).....	98
Figura 6.1 a) – Cruzamento EN 221 com a EN 315 km 56+600 (f.d) e km 56+700 (f.e)	99
Figura 6.1 b) – Estado atual do pavimento no cruzamento EN 221 com a EN 315.....	99
Figura 6.2) – Estado de degradação do pavimento ao km 66+200 (faixa da direita).....	100

Figura 6.3) – Estado de degradação do pavimento ao km 70+800 (faixa da direita).....	100
Figura 6.13 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para a percentagem de betume	105
Figura 6.14 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para a percentagem de <i>filler</i>	107
Figura 6.15 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para o grau de compactação	109
Figura 6.16 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para a espessura da camada (intervalos recomendados pelo MACOPAV)	111
Figura 6.16 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para a espessura da camada (espessura mínima imposta em sede de formulação)	112
Figura III.1 – Variação do N_{130} em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 56+600 (faixa da direita)	vi
Figura III.3 – Variação do N_{130} em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 69+000 (faixa da direita)	vii

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco et al, 2011)..... 7

Quadro 2.2 – Camadas constituintes de um pavimento flexível, função e respectivas características (EP – JAE, 1995; Azevedo, 2001; Pereira, 2003; Branco et al, 2011)..... 10

Quadro 3.1 – Famílias e Tipos de degradações (Pereira e Miranda, 1999). 18

Quadro 5.a – Variáveis de Projeto (*adaptado de Oliveira, 2001*)..... 57

Quadro 5.b – Variáveis de Obra (*adaptado de Oliveira, 2001*)..... 57

Quadro 6.1 – Características base das misturas betuminosas consideradas em sede de projeto 64

Quadro 6.2 – Variáveis de projeto consideradas na conceção 65

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Caracterização do tráfego segundo o MACOPAV (JAE, 1995).....	39
Tabela 6.1 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 56+600 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação.....	71
Tabela 6.2 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 66+200 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação.....	73
Tabela 6.3 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 69+000 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação.....	75
Tabela 6.4 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 70+500 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação.....	77
Tabela 6.5 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 70+800 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação.....	79
Tabela 6.6 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 72+500 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação.....	81
Tabela 6.7 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 56+700 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação.....	83
Tabela 6.8 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 61+800 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação.....	85
Tabela 6.9 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 66+000 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação.....	87
Tabela 6.10 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 72+700 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação.....	89
Tabela 6.11 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 73+000 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação.....	91
Tabela 6.12 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 75+000 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação.....	93

Tabela 6.13 – Número de eixos-padrão admissível em cada amostra	95
Tabela 6.14 – Número de eixos-padrão admissível em cada amostra, exceto amostra Km 56+600 (d) e Km 66+000 (e)	97
Tabela 6.13 – Valores máximos e mínimos admissíveis para a percentagem de betume	102
Tabela 6.14 – Valores máximos e mínimos admissíveis para a percentagem de filler	103
Tabela 6.15 – Valores máximos e mínimos admissíveis para espessura da camada	103
Tabela 6.15 – Medidas estatísticas determinadas para a percentagem de betume	103
Tabela 6.16 – Resultados estatísticas da frequência relativa dos dados recolhidos para a percentagem de betume	105
Tabela 6.17 – Medidas estatísticas determinadas para a percentagem de filler	106
Tabela 6.18 – Resultados estatísticas da frequência relativa dos dados recolhidos para a percentagem de filler	107
Tabela 6.19 – Medidas estatísticas determinadas para o grau de compactação	108
Tabela 6.20 – Resultados estatísticos da frequência relativa dos dados recolhidos para o grau de compactação.	109
Tabela 6.20 – Medidas estatísticas determinadas para a espessura da camada.....	110
Tabela 6.21 – Resultados estatísticas da frequência relativa dos dados recolhidos para a espessura da camada (intervalos recomendados pelo MACOPAV)	111
Tabela 6.22 – Resultados estatísticas da frequência relativa dos dados recolhidos para a espessura da camada (espessura mínima imposta em sede de formulação).....	112
Tabela 6.23 – Variação dos valores obtidos <i>in situ</i> em relação aos valores previstos em projeto	113
Tabela 6.24 – Comparação dos valores médios, máximos e mínimos, obtidos <i>in situ</i> , com as tolerâncias impostas pelo C.E relativamente aos valores de projeto.....	114

Tabela I.1 – Dados referentes à percentagem de betume observado nas amostras estudadas ...ii

Tabela I.2 – Dados referentes à percentagem de *filler* observado nas amostras estudadasii

Tabela I.3 – Dados referentes ao grau de compactação observado nas amostras estudadas.....iii

Tabela I.4 – Dados referentes à espessura da camada observada nas amostras estudadasiii

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

Tendo sido a rede rodoviária, uma das principais vias de comunicação, que proporcionou a mobilidade de pessoas e bens, contribuindo para o desenvolvimento económico e sociocultural da sociedade, é ainda hoje, para grande parte dos países, a principal infraestrutura de transporte.

Com a crescente evolução e as novas emergências socioeconómicas da sociedade, a partir da década de 50, verificou-se um incremento da intensidade do tráfego, levando assim à necessidade de aumentar a rede rodoviária nacional. Face a esta problemática, foi elaborado o Plano Rodoviário Nacional (PRN85), sendo aprovado em setembro de 1985, com o objetivo de modernizar a rede nacional. Em 1998, de modo a preencher as lacunas pelo plano anterior, foi aprovado o Plano Rodoviário Nacional 2000 (PRN2000) com especial atenção ao desenvolvimento de redes transfronteiriças, assim como o estabelecimento de alternativas a estradas com portagens e a acessibilidade em zonas urbanas.

Sendo a rede rodoviária constituída, essencialmente, por pavimentos flexíveis, em que o seu comportamento é dependente do funcionamento das misturas betuminosas e dos materiais granulares que os formam, começaram a ser desenvolvidos métodos de dimensionamento de forma a obter pavimentos capazes de responder o melhor possível às necessidades do tráfego, como a segurança, durabilidade, conforto, economia, desgaste da superfície do pavimento, e resistência às condições climatéricas.

De forma simplificada, os pavimentos flexíveis são principalmente compostos por dois conjuntos de camadas. Sendo as camadas superiores formadas por misturas betuminosas, e assumem o papel estrutural principal do pavimento. Normalmente as camadas superiores são formadas por uma camada de desgaste, por uma camada de ligação/regularização e uma camada de base. As camadas inferiores são realizadas com materiais granulares estabilizados mecanicamente, formando uma base granular e uma sub-base granular.

Os materiais a utilizar e as espessuras das camadas dos pavimentos rodoviários devem ser fixados em função do tráfego, do solo de fundação, das condições climatéricas da zona em que se insere o traçado e as características dos materiais a empregar na construção. As variáveis a

considerar num projeto de pavimento são o tráfego, o solo de fundação, as características dos materiais e as condições climatéricas.

Tendo em atenção as variáveis do projeto, os métodos de dimensionamento determinam os materiais a empregar e as espessuras das camadas dos pavimentos a adotar. Os métodos de dimensionamento podem ser expeditos, fundamentados em observações do comportamento de pavimentos existentes/experimentais, ou analíticos, assentando em modelações de comportamento dos pavimentos, que relaciona o estado de tensão a que estão sujeitos e as deformações provocadas pelo tráfego e pelas condições climatéricas com o decorrer das degradações estruturais.

No processo de dimensionamento de um pavimento e durante a sua execução existe o risco de aumentar ou diminuir a durabilidade da solução final. Tal aumento ou diminuição da durabilidade do pavimento projetado, depende-se pela “incerteza” e o risco associado à determinação das ações e à variabilidade das características dos materiais.

Na fase de conceção, as ações pressupõem um conjunto de previsões relativas ao tráfego e às condições climatéricas, longe de serem facilmente determinadas, sendo, também, necessário admitir certas características para os materiais que formam as várias camadas do pavimento.

Na fase de execução, a incerteza surge da própria variabilidade intrínseca dos materiais utilizados, das condições de aplicação e da espessura conseguida *in situ*.

Atendendo aos custos associados à construção dum pavimento, sabendo que este representa cerca de 40 a 65% do investimento total destinada à construção da infraestrutura, não se pretende uma solução subdimensionada nem um pavimento sobredimensionado.

Neste contexto é necessário produzir esforços capazes de avaliar e quantificar as diferentes causas de tais incertezas, de modo a minimizar (sabendo que não são totalmente elimináveis) o seu impacto na solução final.

Construir um pavimento idêntico ao obtido em projeto é um objetivo utópico, devido à existência de um vasto conjunto de fatores que durante a execução de um pavimento afetam a sua durabilidade. Para efeitos de estudo, neste trabalho, vão ser considerados quatro fatores envolvidas na construção de um pavimento: percentagem de betume e percentagem de *filler* (fase de fabrico das misturas) e grau de compactação que se repercute na porosidade e espessura da camada betuminosa (fase de execução).

1.2 Objetivos do estudo e metodologia

O trabalho apresentado neste documento, tem como principal objetivo avaliar a influência dos fatores de obra na construção de um pavimento flexível, tendo por base um caso de estudo.

Este trabalho pretende ainda estudar estatisticamente a variabilidade dos fatores de obra, na execução de um determinado trecho, agrupando as ocorrências dos desvios em classes comparáveis com os limites impostos pelo caderno de encargos.

É também objetivo fazer uma listagem de degradações, observáveis no mesmo trecho onde ocorrem os desvios nos fatores de obra, e estabelecer possíveis relações tipo “causa/efeito”

Para a concretização dos objetivos, foram desenvolvidas as seguintes ações:

Primeira ação: Pesquisa Bibliográfica – No âmbito desta tarefa foi realizada uma recolha bibliográfica relativa ao tema apresentado, de modo a conhecer o tipo de pavimentos e suas degradações, compreender as solicitações a que os pavimentos estão sujeitos, principais métodos de dimensionamento e critérios de ruína;

Segunda ação: Definição e concretização do estudo de caso – Definição do estudo em causa, nomeadamente das premissas consideradas em projeto e das variáveis a considerar para efeito de estudo, definição da metodologia de trabalho, tratamento e análise dos dados recolhidas em obra de forma a produzir conclusões.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se organizado em sete capítulos, conforme conteúdo sucintamente descrito, a seguir:

No capítulo um, “**Introdução**”, faz-se o enquadramento temático que se aborda neste estudo, descrevendo os principais objetivos, ações desenvolvidas e estrutura do trabalho;

No capítulo dois, “**Tipologia de pavimentos rodoviários**”, apresenta-se uma breve descrição dos diferentes tipos de pavimentos rodoviários (flexíveis, rígidos e semirrígidos). Para cada tipo de pavimento são abordados aspetos relacionados com a sua constituição e o nível de deformabilidade;

No capítulo três, “**Degradação de pavimentos flexíveis**”, apresentam-se as principais famílias de degradações a que os pavimentos flexíveis estão sujeitos, abordando a sua evolução na vida dos pavimentos, assim como os fatores envolvidos no processo de degradação;

No capítulo quatro, “**Dimensionamento de pavimentos flexíveis**”, apresenta-se a problemática do dimensionamento de pavimentos, sendo abordado, embora de forma sucinta, os métodos empíricos e mais aprofundadamente os métodos empírico-mecanicistas, tendo em conta as solicitações e caracterização mecânica dos materiais. É feita também referência às vantagens da utilização dos métodos empírico-mecanicistas no dimensionamento de pavimentos flexíveis;

No capítulo cinco, “**Variáveis de projeto e de obra no dimensionamento de pavimentos flexíveis**”, abordam-se as diferentes variáveis a considerar no dimensionamento de um pavimento flexível, agrupando-as em variáveis de projeto e variáveis de obra, de acordo com a fase onde é suscetível ocorrer a sua variação/determinação. Refere-se ainda a sua influência no desempenho da estrutura do pavimento;

No capítulo seis, “**Estudo de caso**”, inicia-se a componente prática deste trabalho. Faz-se um breve enquadramento do caso em estudo, apresentando as premissas adotadas em fase de conceção. É apresentada a metodologia de trabalho a seguir, confinando o estudo à variabilidade dos fatores de obra sentidos na camada betuminosa de regularização, de acordo com os dados amostrais disponíveis. São apresentados e discutidos os resultados obtidos através do tratamento das amostras da campanha de controlo efetuadas durante processo construtivo do trecho de pavimento em estudo.

No capítulo sete, “**Conclusões finais**”, faz-se uma síntese das principais conclusões retiradas do estudo efetuado, no que respeita à influência das variáveis de obra na vida útil dum pavimento flexível. Apontam-se algumas limitações, assim como propostas de melhoria a considerar em eventuais trabalhos futuros sobre esta temática.

2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

2.1 Introdução

Segundo LNEC-E1 (1962), um pavimento é “parte da estrada, rua ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respectivas solicitações à infraestrutura: terreno, obras de arte, etc.”

A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período (a vida do pavimento) sob a ação das ações do tráfego, e nas condições climáticas que ocorram (Branco et al, 2011).

De modo a garantir tal função, os pavimentos devem apresentar dois tipos de qualidades, sendo uma delas a qualidade funcional e a outra a qualidade estrutural.

No que diz respeito à qualidade funcional, os pavimentos devem garantir uma superfície regular e resistente com suficiente aderência e resistência ao desgaste, de modo a garantir comodidade e segurança de circulação (Minhoto, 2008).

Relativamente à qualidade estrutural, de acordo com Branco et al (2011), a mesma está relacionada com a capacidade do pavimento para suportar as cargas de veículos sem sofrer alterações para além de determinados valores limites, as quais colocariam em causa a garantia da qualidade funcional, aquela que é captada pelos utentes rodoviários.

Um pavimento rodoviário é considerado como um sistema multi-estratificado, sistema esse formado por várias camadas de espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural (maciço semi-indefinido), o qual pode ter um coroamento de qualidade melhorada. Na figura 2.1 é apresentada esquematicamente a constituição de um pavimento, indicando as principais ações a que está sujeito, como a ação do tráfego (pesado) a as ações climáticas que vão desde a variação da temperatura até à água (Branco et al, 2011).

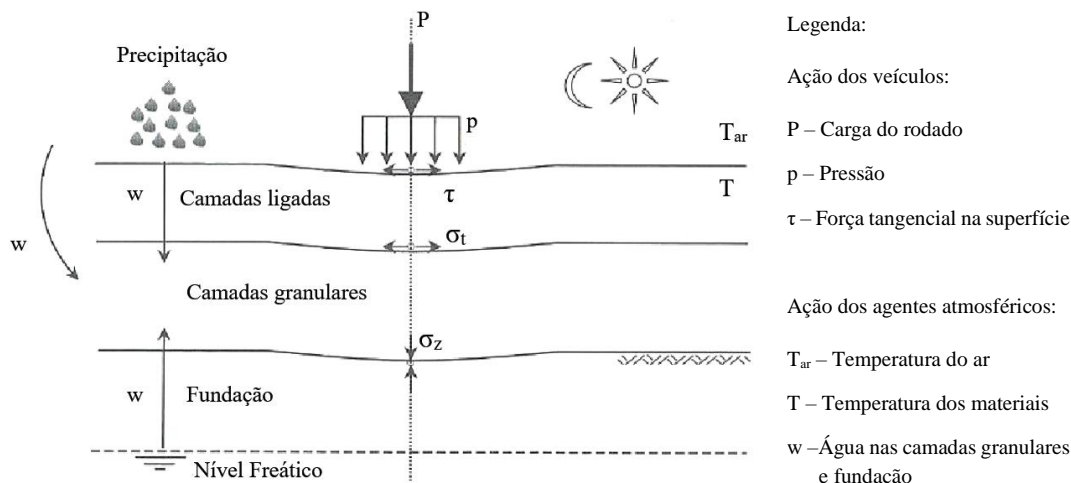


Figura 2.1 – Pavimento rodoviário: constituição e ações (Branco et al, 2011)

Na parte superior do pavimento, encontram-se as camadas ligadas, sendo constituídas por materiais granulares (brita e areias) estabilizadas com ligantes betuminosos ou hidráulicos, dependendo do tipo de pavimentos. Inferiormente às camadas ligadas, encontram-se as camadas granulares, constituídas por materiais granulares naturais ou britados, estabilizados mecanicamente por compactação. As camadas granulares encontram-se apoiadas sobre a fundação, geralmente constituída por terreno natural ou por material granular em aterro.

As diferentes camadas dispõem-se, normalmente, com qualidade e resistência decrescente de cima para baixo, em consonância com a progressiva redução dos esforços em profundidade, sendo que, cada uma delas, irá servir de apoio à realização da camada subjacente (Branco et al, 2011).

De acordo com a maneira como se podem associar as camadas constituídas pelos diferentes tipos de materiais, resultam diferentes tipos de pavimentos, que apresentam diferentes comportamentos quando solicitados pelas cargas dos veículos em combinação com as condições climáticas a que estão sujeitos. Assim, atendendo ao tipo de materiais e à deformabilidade das camadas, podem distinguir-se, de uma forma geral, três tipos de pavimentos rodoviários: flexíveis, rígidos e semirrígidos. No quadro 2.1 indicam-se os materiais e o nível de deformabilidade para cada um dos três tipos de pavimentos rodoviários (Branco et al, 2011).

Quadro 2.1 – Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco et al, 2011)

Tipo de Pavimento	Materiais (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semi-rígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

Os pavimentos flexíveis apresentam as camadas superiores constituídas por misturas betuminosas compactadas e estabilizadas com ligantes hidrocarbonados e, imediatamente abaixo uma ou duas camadas formadas por material granular. Este tipo de pavimento, de acordo com Branco et al (2011), em bom estado e sob as ações de carga de um eixo com a carga total de 130kN (65kN aplicada numa “roda dupla”), apresenta uma deformabilidade entre 250 e 500 μ m.

Os pavimentos rígidos apresentam uma camada superior formada por betão de cimento, sendo geralmente empregue o cimento Portland, e imediatamente a seguir e inferiormente, uma ou duas camadas constituídas por material granular, podendo ser estabilizado com ligante hidráulico e/ou apenas por material granular estabilizado mecanicamente. Segundo Branco et al (2011), este tipo de pavimento apresenta deformações reduzidas, em geral inferiores a 200 μ m.

Os pavimentos semirrígidos, na sua constituição, são “uma mistura” dos dois tipos de pavimentos anteriores, apresentando uma ou duas camadas superiores formadas por misturas betuminosas, seguidas inferiormente por uma camada formada por agregado estabilizado com ligante hidráulico, podendo ainda dispor de uma camada granular de sub-base. No que diz respeito à deformabilidade, este tipo de pavimento, apresenta valores entre 200 μ m e 400 μ m (Branco et al, 2011).

De acordo com os mesmos autores, há que distinguir dois tipos de camadas na constituição do pavimento, sendo uma delas, as camadas ligadas, dotadas de coesão, com capacidade para suportar todos os tipos de esforços de compressão, tração e corte, e a outra, as camadas não

ligadas, cuja resistência depende essencialmente do atrito interno, e que tal como o solo, apenas suportam os esforços de compressão e corte.

Em função dos objetivos do presente trabalho e dado que a maior parte de extensão da rede rodoviária nacional é formada por pavimentos flexíveis, será dado, naturalmente, maior relevo a este tipo de pavimentos.

2.2 Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos flexíveis apresentam uma constituição diversa, dependendo da intensidade do tráfego da resistência ao solo de fundação e das características dos materiais disponíveis (Branco et al, 2011).

A estrutura dos pavimentos flexíveis encontra-se ligada à fundação, transmitindo-lhe as cargas aplicadas à superfície. A estabilidade da estrutura deste tipo de pavimentos depende essencialmente do atrito, da coesão e da forma como estão rearranjados os agregados (O’Flaherty, C.A., 1988).

Dependendo das solicitações, da qualidade das características dos materiais e das opções de projeto, surgem, naturalmente, dois tipos de pavimentos flexíveis, um com a camada de base em materiais granulares e outro com camada de base em misturas betuminosas. Na figura 2.2 ilustra-se esquematicamente um exemplo tipo de pavimento flexível, misturando os tipos de materiais que formam as camadas.

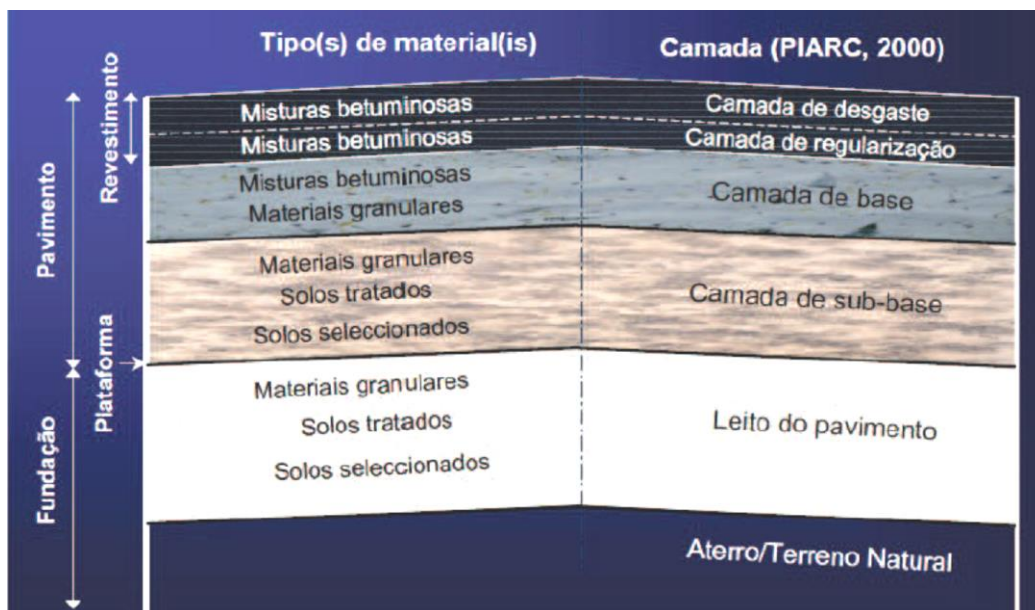


Figura 2.2 – Constituição de um pavimento flexível (LNEC, 2005).

Perante solicitações pouco intensas e na disponibilidade de materiais granulares de boa qualidade, a custo favorável, podem ser projetados e construídos pavimentos nos quais as camadas de base são predominantemente formadas por materiais granulares estabilizados mecanicamente. Neste tipo de pavimentos, as camadas granulares constituem o principal elemento resistente da estrutura. Em contrapartida, na existência de ações de tráfego mais intensas, em regiões com escassos recursos materiais granulares e perante uma fundação de reduzida capacidade de suporte, será necessário projetar e construir um pavimento que integre na sua estrutura camadas betuminosas. Assim, a camada de base trabalhará em flexão diminuindo significativamente o nível das tensões transmitidas à fundação.

Nos pavimentos flexíveis, as diferentes camadas que constituem a estrutura do pavimento, indicadas na figura 2.2, podem existir na sua totalidade, ou dependendo de fatores relacionados com a solicitação e os materiais disponíveis, algumas dessas camadas podem não fazer parte da constituição da estrutura do pavimento, como o caso da camada de regularização, ou a camada de sub-base (Jacinto, 2003).

No quadro 2.2, de acordo com o “Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional” (EP – JAE, 1995), Azevedo (2001), Pereira (2003), e Branco et al (2011), são apresentadas as principais características das camadas constituintes dos pavimentos flexíveis, sua função, as espessuras geralmente adotadas para as camadas, assim como os símbolos

estabelecidos nas rubricas dos trabalhos rodoviários associados aos materiais de construção de integram as camadas constituintes.

Quadro 2.2 – Camadas constituintes de um pavimento flexível, função e respetivas características (EP – JAE, 1995; Azevedo, 2001; Pereira, 2003; Branco et al, 2011).

Camadas	Principais características (designações)	Função	Espessura
Camada de desgaste	Betão betuminoso (BD): Constituído por material com agregado de alta resistência com dimensão máxima de agregado de 14mm, teor em betume entre 5,2 a 5,8% e uma porosidade entre 3 a 5%.	<ul style="list-style-type: none"> – Impermeabilização; – Superfície adequada à circulação de veículos em condições de conforto e segurança; – Distribuição das tensões induzidas pelo tráfego. 	4 – 6cm
Camada de regularização	Mistura betuminosa densa (MBD): Constituída por agregado com dimensão máxima de 16mm, teor em betume entre 4,8 a 5,4% e porosidade de 4 a 6%.	<ul style="list-style-type: none"> – Superfície regular e desempenada, com vista à execução da camada de desgaste; – Distribuição das tensões induzidas pelo tráfego e transfere para as camadas inferiores as tensões transmitidas ao nível da camada de desgaste. 	5 – 8cm
	Macadame betuminoso (MB): Constituído genericamente por agregados com granulometria extensa, com dimensão máxima de 25mm, teor em betume entre 4 a 5% e porosidade entre 4 a 8%.		8 – 12cm
Camada de base	Macadame betuminoso (MB): Camada constituída por agregado com granulometria extensa, com dimensão de 37,5mm, teor em betume na ordem dos 4 a 4,8% e porosidade entre 6 a 9%.	<ul style="list-style-type: none"> – Distribuição de tensões induzidas pelo tráfego, degradando-as de forma que a capacidade de suporte das camadas subjacentes não seja excedida. 	9 – 15cm com um mínimo de 8cm e máximo de 16cm
	Material britado sem recomposição (<i>tout-venant</i>) (BG):		20cm

	Constituído por agregados de granulometria extensa de dimensão máxima de 37,5cm estabilizados por compactação. Deve apresentar um equivalente de areia $\geq 50\%$ e uma perda por desgaste de Los Angeles $\leq 40\%$ (granulometria A).		
Camada de sub-base	Material britado sem recomposição (tout-venant) (SbG): Camada constituída por agregados de granulometria extensa de dimensão máxima de 50cm estabilizado por compactação, com um equivalente de areia $\geq 45\%$ e uma perda por desgaste de Los Angeles $\leq 45\%$ (granulometria A).	<ul style="list-style-type: none"> – Redistribui e transfere para a fundação, as tensões transmitidas ao nível da base; – Possibilita a compactação da base em boas condições; – Garante a traficabilidade do equipamento de obra; – Permite a drenagem do pavimento evitando a estagnação da água, impedindo a ascensão da água por capilaridade para as camadas nobres (superiores) do pavimento. 	20cm

O “Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional”, da Junta Autónoma de Estradas (EP-JAE, 1995) propõe duas estruturas de pavimentos flexíveis, conforme indicado na figura 2.3: - estrutura a) destinada a um tráfego reduzido, considerando uma fundação com elevada capacidade de suporte, e estrutura b) destinada a um tráfego intenso e com uma fundação de reduzida capacidade. Na mesma figura (2.3) apresenta-se para cada camada, a sua espessura, o material que constitui e os valores típicos das suas características mecânicas como o módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson.

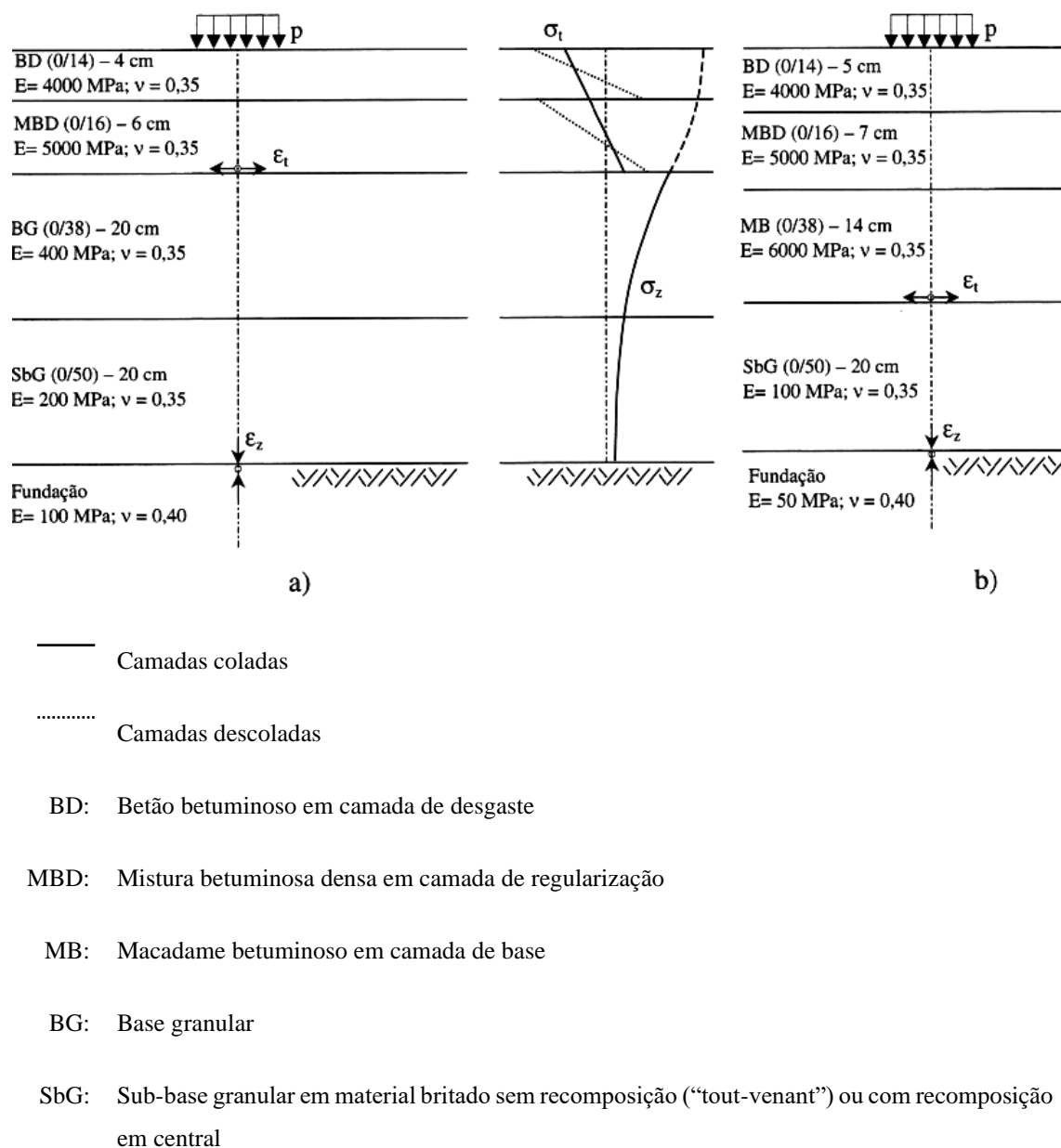


Figura 2.3 – Constituição e comportamento de um pavimento flexível (Branco et al, 2011).

No que respeita ao modo de funcionamento dos pavimentos flexíveis, o mesmo encontra-se dependente das características dos materiais de cada camada, da sua espessura, e das condições das interfaces das respetivas camadas. Assim, através de disposições construtivas, como por exemplo a realização de uma “rega de colagem” com emulsões betuminosas entre as camadas betuminosas, procura-se que as mesmas fiquem coladas entre si, funcionando, portanto, como uma única camada. Verificadas tais condições de interface, as camadas betuminosas estão submetidas a um estado de tensão mais reduzido, como se pode observar na figura 2.3 traço contínuo, (Branco et al, 2011). No plano vertical, o estado de tensão varia de uma tensão de

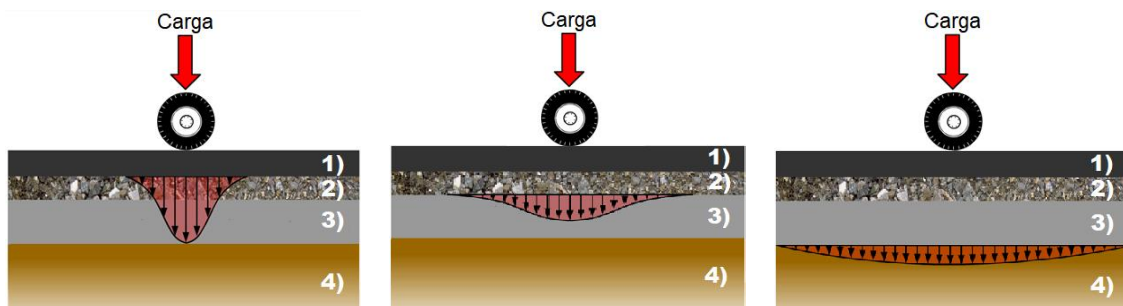
compressão máxima na face superior da camada de desgaste, até um valor máximo de tensão de tração na face inferior da última camada (betuminosa).

Por erros de construção ou por deterioração da ligação entre as camadas, após algum tempo de serviço, uma interface considerada “colada” em projeto pode passar a descolada. Nestas circunstâncias, para cada uma das camadas betuminosas, ocorrem tensões máximas de compressão na face superior e tensões máximas de compressão na face inferior, conforme apresentado na figura 2.3 traço descontínuo. Nesta situação de interfaces “descoladas” o estado de tensão é muito mais severo que o verificado numa situação de interfaces “coladas”.

Nos casos em que se tenha considerado, em fase de projeto, interfaces coladas e depois na prática se tenha passado para interfaces “descoladas” podem ocorrer duas situações que contribuem para a evolução acelerada das degradações do pavimento, sendo uma delas a ocorrência de tensões máximas de tração na face inferior da última camada betuminosa superiores às tensões admissíveis consideradas em projeto e, por outro lado, a camada de desgaste pode ficar sujeita a esforços de tração para os quais não foi concebida.

No que diz respeito às camadas granulares, visto que estas não têm capacidade para resistir a esforços de tração, verifica-se uma variação dos esforços de compressão, sendo máximos à superfície e que vão reduzindo em profundidade, em função das características resistentes das camadas constituintes do pavimento, conforme apresentado na fig. 2.3.

A estrutura total dos pavimentos flexíveis, sob as ações induzidas pelo tráfego, deforma-se mais quando comparado com os restantes tipos de pavimentos (Minhoto, 2005). As cargas induzidas pelo tráfego são suportadas pelas camadas ligadas (betuminosas) e pelas camadas granulares, sendo estas degradadas em profundidade, ou seja, cada camada recebe as cargas de camada superior redistribuindo e transmitindo-a à camada inferior, conforme se ilustra na figura 2.4. Assim, a parte inferior da estrutura do pavimento, de uma camada particular, fica sujeita a uma tensão menor (menor relação força por área) (Interactive, 2008).



- a) Distribuição de tensões entre o revestimento e a base b) Distribuição de tensões entre a base e a sub-base c) Distribuição de tensões entre a sub-base e a fundação

1) Camadas de revestimentos; 2) Base; 3) Sub-base; 4) Solo de fundação

Figura 2.4: Distribuição de tensões verticais nas várias camadas que constituem um pavimento flexível (adaptado de Alves, 2007; Interactive, 2008; Santos,2009).

As tensões instaladas ao nível das diferentes camadas determinam, em geral, uma evolução típica dos pavimentos flexíveis, no que respeita os estados últimos de ruína, como por exemplo, o fendilhamento das camadas betuminosas e a deformação permanente das camadas em geral, os quais são tidos em conta pelos principais métodos de dimensionamento (Branco et al, 2011).

Os pavimentos flexíveis estão generalizados em percursos interurbanos e suburbanos, apresentando muitas vezes uma vantagem em relação aos pavimentos rígidos, principalmente, no interior das cidades, uma vez que permitem proceder mais facilmente a trabalhos de escavações e de reposição, associados à colocação inicial ou reparação de infraestruturas urbanas (condutas, cabos de eletricidade, gás, etc.) (Alves, 2007).

3. DEGRADAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

3.1 Introdução

Os pavimentos rodoviários, mesmo antes da sua entrada em serviço, já foram submetidos a ações atmosféricas que contribuíram para a sua degradação (Azevedo, J., 2013).

Após a sua construção e entrada em serviço, os pavimentos ficam sujeitos a um conjunto de ações, quer por ação de passagem de tráfego, quer por ação de agentes atmosféricos (Antunes, 2005). Por sua vez, tais ações, contribuem para a degradação dos pavimentos, traduzindo-se numa redução progressiva da qualidade inicial dos mesmos (Atkinson, K., 1997).

Da atuação das ações resulta uma alteração das propriedades dos materiais constituintes de um pavimento, fazendo com que uma mesma ação, ao repetir-se, provoque estados de tensão diferentes no mesmo pavimento (Minhoto, M., 2005).

Assim, a evolução das degradações de um pavimento apoia-se no “princípio da cadeia das consequências”, sendo que uma degradação não evolui isoladamente no tempo, mas que dá origem a outras degradações, iniciando-se uma atividade em ciclo, onde as diferentes degradações interferem mutuamente (Pereira e Miranda, 1999).

Na figura 3.1, mostra-se um esquema exemplificativo da evolução das solicitações num pavimento rodoviário.

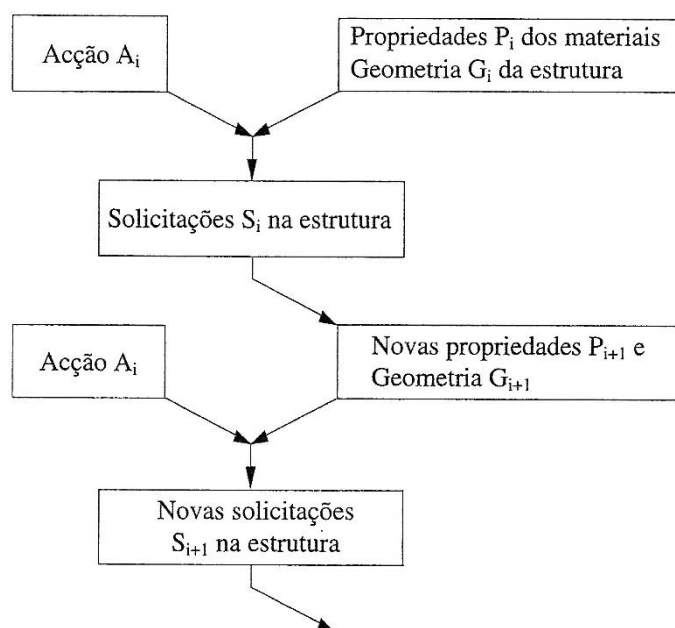


Figura 3.1 – Evolução das solicitações num pavimento rodoviário (Pereira e Miranda, 1999).

Atendendo à figura 3.1 (Pereira e Miranda, 1999), a ação A_i , correspondente ao tráfego, quando atua sobre o pavimento com determinadas propriedades dos materiais constituintes (P_i) e geometria da estrutura do pavimento (G_i), em determinadas condições climáticas, provocará nos materiais as solicitações S_i (σ_t e σ_z). Por sua vez, as solicitações S_i , modificam as propriedades iniciais (P_i) dos materiais, resultando assim nas propriedades P_{i+1} e G_{i+1} , que mesmo quando forem solicitadas, novamente, pela mesma ação A_i , serão originadas novas solicitações (S_{i+1}), e assim sucessivamente (Pereira e Miranda, 1999).

De acordo com os mesmos autores, o processo de degradação de um pavimento depende de dois grupos de fatores:

- Fatores passivos: características de pavimento construído, como a espessura das camadas, materiais utilizados e qualidade da construção;

- Fatores ativos: compreendem as ações do tráfego e dos agentes climáticos, sendo estes fatores os principais responsáveis pelo processo de degradação.

Todavia, para além dos fatores passivos e ativos, envolvidos no processo de degradação, há que considerar, também, a qualidade da ligação entre a camada de desgaste e a base, o subdimensionamento da camada de desgaste ou das camadas inferiores, a reduzida compacidade das camadas estruturais, deficiência de construção das juntas, condições de drenagem, a qualidade dos materiais utilizados e a capacidade de suporte insuficiente do solo de fundação (Almeida, L.C., 2013; Ribeiro, R.M., 2012; Alves, T.S., 2007).

3.2 Famílias e Tipos de Degradações de Pavimentos Flexíveis

Um pavimento flexível apresenta ao longo da sua vida uma evolução que, em geral, se traduz no aparecimento de uma vasta diversidade de degradações, as quais contribuem para uma contínua redução da qualidade do pavimento, sendo que as degradações mais relevantes compreendem o aparecimento de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas (Pereira e Miranda, 1999).

Ainda segundo Pereira e Miranda (1999), a diversidade das degradações nos pavimentos flexíveis pode ser mais vasta, podendo ser agrupadas nas seguintes famílias:

- Deformação;
- Fendilhamento;

- Desagregação da camada de desgaste;
- Movimento de materiais.

As eventuais reparações nas camadas de desgaste, à luz do “Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários” (EP, 2008), são consideradas patologias, uma vez que, mesmo quando bem realizadas, criam descontinuidades e tornam-se locais suscetíveis ao surgimento da mesma ou de novas patologias.

No quadro 3.1 (Pereira e Miranda, 1999), são apresentadas as quatro famílias de degradações de pavimentos flexíveis, que por sua vez se dividem em vários tipos de degradações.

Quadro 3.1 – Famílias e Tipos de degradações (Pereira e Miranda, 1999).

Família de Degradações	Tipos de Degradações														
Deformações	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="612 479 719 501">Abatimento</td> <td data-bbox="772 450 879 555"> <table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 450 879 524">longitudinal</td> <td data-bbox="979 434 1038 501">berma</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 524 879 555">transversal</td> <td data-bbox="979 472 1023 501">eixo</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="612 629 831 696">Deformações localizadas Ondulações</td> </tr> <tr> <td data-bbox="612 801 692 824">Rodeiras</td> <td data-bbox="772 770 1075 860"> <table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 770 1075 815">grande raio (camadas inferiores)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 815 1075 860">pequeno raio (camadas superiores)</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	Abatimento	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 450 879 524">longitudinal</td> <td data-bbox="979 434 1038 501">berma</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 524 879 555">transversal</td> <td data-bbox="979 472 1023 501">eixo</td> </tr> </table>	longitudinal	berma	transversal	eixo	Deformações localizadas Ondulações		Rodeiras	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 770 1075 815">grande raio (camadas inferiores)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 815 1075 860">pequeno raio (camadas superiores)</td> </tr> </table>	grande raio (camadas inferiores)	pequeno raio (camadas superiores)		
Abatimento	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 450 879 524">longitudinal</td> <td data-bbox="979 434 1038 501">berma</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 524 879 555">transversal</td> <td data-bbox="979 472 1023 501">eixo</td> </tr> </table>	longitudinal	berma	transversal	eixo										
longitudinal	berma														
transversal	eixo														
Deformações localizadas Ondulações															
Rodeiras	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 770 1075 815">grande raio (camadas inferiores)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 815 1075 860">pequeno raio (camadas superiores)</td> </tr> </table>	grande raio (camadas inferiores)	pequeno raio (camadas superiores)												
grande raio (camadas inferiores)															
pequeno raio (camadas superiores)															
Fendilhamento	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="612 1048 676 1070">Fendas</td> <td data-bbox="772 943 1038 1182"> <table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 943 831 972">fadiga</td> <td data-bbox="979 1003 1038 1070">eixo</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1025 879 1055">longitudinais</td> <td data-bbox="979 1032 1038 1061">berma</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1099 879 1128">transversais</td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1151 879 1182">parabólicas</td> <td></td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="612 1279 767 1301">Pele de crocodilo</td> <td data-bbox="820 1256 1011 1323"> <table border="0"> <tr> <td data-bbox="820 1256 1011 1285">malha fina ($\leq 40\text{cm}$)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="820 1285 1011 1314">malha larga ($> 40\text{cm}$)</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>	Fendas	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 943 831 972">fadiga</td> <td data-bbox="979 1003 1038 1070">eixo</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1025 879 1055">longitudinais</td> <td data-bbox="979 1032 1038 1061">berma</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1099 879 1128">transversais</td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1151 879 1182">parabólicas</td> <td></td> </tr> </table>	fadiga	eixo	longitudinais	berma	transversais		parabólicas		Pele de crocodilo	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="820 1256 1011 1285">malha fina ($\leq 40\text{cm}$)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="820 1285 1011 1314">malha larga ($> 40\text{cm}$)</td> </tr> </table>	malha fina ($\leq 40\text{cm}$)	malha larga ($> 40\text{cm}$)
Fendas	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="772 943 831 972">fadiga</td> <td data-bbox="979 1003 1038 1070">eixo</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1025 879 1055">longitudinais</td> <td data-bbox="979 1032 1038 1061">berma</td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1099 879 1128">transversais</td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="772 1151 879 1182">parabólicas</td> <td></td> </tr> </table>	fadiga	eixo	longitudinais	berma	transversais		parabólicas							
fadiga	eixo														
longitudinais	berma														
transversais															
parabólicas															
Pele de crocodilo	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="820 1256 1011 1285">malha fina ($\leq 40\text{cm}$)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="820 1285 1011 1314">malha larga ($> 40\text{cm}$)</td> </tr> </table>	malha fina ($\leq 40\text{cm}$)	malha larga ($> 40\text{cm}$)												
malha fina ($\leq 40\text{cm}$)															
malha larga ($> 40\text{cm}$)															
Desagregação da camada de desgaste	<p data-bbox="612 1406 831 1435">Desagregação superficial</p> <p data-bbox="612 1451 746 1480">Cabeça de gato</p> <p data-bbox="612 1496 683 1525">Peladas</p> <p data-bbox="612 1541 746 1570">Ninhos (covas)</p>														
Movimentação de materiais	<p data-bbox="612 1659 708 1688">Exsudação</p> <p data-bbox="612 1704 746 1733">Subida de finos</p>														

3.3 Deformações

Segundo Minhoto (2005), as deformações permanentes nas camadas betuminosas encontram-se associadas à fluência das camadas inferiores, à redução de porosidade devido à compactação, aos fenômenos de corte ou por rotura plástica das misturas.

Em Pereira e Miranda (1999), são apontadas como principais causas de aparecimento das deformações, a capacidade deficiente de suporte do solo de fundação, a capacidade insuficiente das camadas estruturais do pavimento, assim como, as más condições de drenagem.

As deformações permanentes observáveis na superfície de um pavimento, conforme indicado anteriormente no quadro 3.1, podem ser subdivididas nos seguintes tipos:

- Abatimento (longitudinal, transversal);
- Ondulação;
- Deformações localizadas;
- Rodeiras (Pereira e Miranda, 1999).

O abatimento é uma deformação com uma extensão significativa, podendo encontrar-se ao longo do pavimento (junto à berma, ou ao longo da faixa de rodagem) ou na direção transversal. O abatimento longitudinal, junto à berma deve-se à redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, podendo relacionar-se com a entrada de água. O abatimento longitudinal, ao longo do eixo pode acontecer quando exista um fendilhamento ao longo do eixo, devido à redução da capacidade de suporte por infiltração de água até às camadas inferiores granulares e ao solo de fundação.

O abatimento transversal depende da ocorrência de patologias nas camadas inferiores, nomeadamente no solo de fundação e das camadas granulares (Pereira e Miranda, 1999).

Outro tipo de deformação são as “deformações localizadas” que se encontram numa pequena área do pavimento, formando depressões que se podem dever à falta de capacidade de suporte do solo de fundação, deficiente capacidade em zonas pontuais das camadas granulares, ou até por rotura de canalizações existentes no subsolo (Santos, M., 2009).

As ondulações são uma deformação transversal repetida com determinada frequência ao longo do pavimento que ocorre nas camadas de desgaste devido a uma má distribuição de ligante. Pode também verificar-se nas camadas de betão betuminoso em que ocorre o arrastamento de mistura por excessiva deformação plástica, devido à ação do tráfego. Noutros casos, podem

ainda resultar suaves ondulações de pavimento, com origem na deformação da fundação (Minhoto, 2005; Pinto, J., 2003; Pereira e Miranda, 1999).

As rodeiras são o tipo de degradação, mais frequente, da família das degradações, consistindo na deformação permanente do pavimento na zona de passagem dos pneus dos veículos (Minhoto, 2005).

De acordo com Pereira e Miranda (1999), através da observação do perfil transversal do pavimento, as rodeiras podem classificar-se em rodeiras de pequeno raio (figura 3.2) e rodeiras de grande raio (figura 3.3).

As rodeiras de pequeno raio (figura 3.2) resultam de uma maior contribuição das camadas betuminosas superiores, particularmente da camada de desgaste, resultante da reduzida resistência à deformação plástica das misturas betuminosas, em consequência do emprego de um ligante mole, de uma dosagem incorreta e deficiente qualidade do agregado (Pereira e Miranda, 1999; Santos, M., 2009; Maia, 2012).



Figura 3.2 – Representação esquemática das rodeiras de pequeno raio causadas pelas deformações permanentes nas camadas betuminosas (adaptado de Maia, I.M., 2012 e de Santucci, L., 2001).

As rodeiras de grande raio (figura 3.3) devem-se a deformações das camadas granulares inferiores e, em particular, do solo de fundação, em condições desfavoráveis, decorrentes por exemplo de uma drenagem ineficaz, diminuindo assim a capacidade estrutural (Pereira e Miranda, 1999; Santos, M., 2009; Maia, 2012).

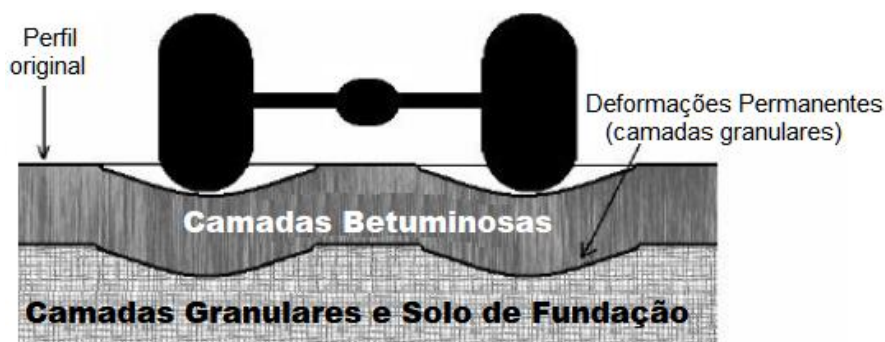


Figura 3.3 – Representação esquemática das rodeiras de grande raio causadas pelas deformações permanentes nas camadas granulares betuminosas (adaptado de Maia, I.M., 2012 e de Santucci, L., 2001).

3.4 Fendilhamento

Dentro das patologias mais comuns nos pavimentos flexíveis, o fendilhamento apresenta-se como sendo uma das principais causas de degradação dos pavimentos, possuindo o maior número de ocorrências (Azevedo, J.F.M., 2013; Fonseca, P.M.L., 2011).

O fendilhamento resulta, principalmente, da fadiga dos materiais das camadas betuminosas, devido à repetição dos esforços de tração por flexão destas camadas (Branco et al, 2011). Em alguns destes casos, o fendilhamento pode ocorrer também devido à concentração de tensões provocadas pela ação térmica, sendo o seu aparecimento um dos primeiros sinais da redução de qualidade estrutural do pavimento (Minhoto, 2005).

Como já foi referido anteriormente no quadro 3.1 (Pereira e Miranda, 1999), o fendilhamento integra um elevado número de tipos de degradações, podendo destacar-se dois grupos. No primeiro grupo, distinguem-se as fendas resultantes da fadiga do pavimento, as fendas longitudinais, as fendas transversais e as fendas parabólicas. O segundo grupo, o mais importante do fendilhamento, é constituído pela pele de crocodilo, resultante da evolução das fendas ramificadas.

É de salientar que, em pavimentos com elevada espessura das camadas betuminosas, se tem observado “fendilhamento com origem à superfície” propagando-se em profundidade.

Segundo Freitas (2004) e Antunes (2005), este tipo de fendilhamento poderá estar associado à deficiente construção das camadas betuminosas e à agressividade do tráfego pesado, como por

exemplo, pneus de base larga e elevada pressão de enchimento, induzindo assim elevadas tensões de tração na superfície do pavimento.

As fendas por fadiga são as mais comuns, com origem na base das camadas betuminosas (figura 3.4) devido à repetida aplicação dos esforços de tração induzidos pela passagem dos rodados dos veículos pesados (Alves, T.S., 2007).



Figura 3.4 – Fendilhamento das camadas betuminosas (adaptado de Antunes, M., et al, 2005).

As fendas por fadiga localizam-se na zona de passagem dos rodados dos veículos podendo ser classificados, quanto à sua fase de desenvolvimento, em isolados (geralmente orientados no sentido longitudinal) e ramificados. Quanto ao afastamento dos seus bordos, podem ainda classificar-se em fechados e abertos (Branco et al, 2011). Como principais possíveis causas destaca-se a fadiga das camadas betuminosas, falta de capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação e deficiente qualidade das misturas betuminosas (Almeida, L.C., 2013; EP, S.A., 2008; Pereira e Miranda, 1999).

As fendas longitudinais desenvolvem-se paralelamente ao eixo da estrada localizando-se, geralmente, ao longo da zona de passagem dos veículos e por vezes junto ao eixo da estrada. Habitualmente, as fendas visíveis resultam da sua propagação desde as camadas ligadas inferiores até à superfície (Azevedo, J.F.M., 2013).

As causas possíveis são a deficiência da junta longitudinal de construção, que pode resultar da dificuldade de compactar eficazmente a extremidade da zona pavimentada, quando vias adjacentes não são efetuadas simultaneamente (Capitão, 2012).

A evolução das fendas longitudinais inicia-se com a desagregação dos bordos, seguindo-se a infiltração de água e conseqüente enfraquecimento das camadas inferiores (granulares) com

posterior aparecimento de outras fendas, como por exemplo a pele de crocodilo (Pinto, J.I.B.R., 2003).

As fendas transversais surgem perpendicularmente ao eixo da via, isoladas ou com um espaçamento variável, abrangendo parte ou toda a largura da faixa de rodagem (Alves, T.S., 2007), podendo surgir também junto das obras de arte (Pinto, J.I.B.R., 2003).

Este tipo de fendilhamento pode ser resultado de uma deficiência da junta transversal de construção, da retração térmica do material localizado em climas frios ou da capacidade de suporte diferenciada da fundação.

As fendas parabólicas manifestam-se na zona de passagem do tráfego, com o eixo da parábola orientado no sentido longitudinal, tendendo a uma regularidade geométrica, podendo apresentar-se em blocos de vários tamanhos (Maia, I.M., 2012). Este tipo de fendas surge como consequência de problemas de estabilidade da camada de desgaste e da sua ligação às camadas betuminosas subjacentes, elevados esforços tangenciais induzidos pelos rodados do tráfego, grandes variações de temperatura ao longo do dia, incapacidade do ligante asfáltico (betume) para expandir e contrariar os ciclos de temperatura.

Como já foi referido, a pele de crocodilo integra o grupo mais importante das degradações por fendilhamento. A pele de crocodilo é uma fenda que forma entre si uma malha de grelha com dimensão variada, localizada inicialmente na zona de passagem dos rodados dos veículos, abrangendo progressivamente toda a largura da via. Quanto à abertura da malha, pode classificar-se em malha estreita (lado da malha $\leq 40\text{cm}$) ou em malha larga (lado da malha $\geq 40\text{cm}$) e, no que diz respeito à abertura dos bordos das fendas, em aberta ou fechada. As causas para este tipo de fendilhamento podem ser as mesmas que já foram descritas anteriormente para as fendas por fadiga (Pereira e Miranda, 1999). Na figura 3.5 é apresentado um pavimento fendilhado evidenciando a pele de crocodilo.



Figura 3.5 – Pavimento fendilhado (pele de crocodilo): estado de pré-ruína (Pereira, P.A., et al, 2003).

3.5 Desagregação da camada de desgaste

A desagregação da camada de desgaste traduz-se essencialmente na perda de qualidade superficial do pavimento, resultante da perda de estabilidade da ligação entre os materiais constituintes da mistura. Este tipo de degradações caracteriza-se pelo desprendimento dos agregados na superfície do pavimento. A desagregação da camada de desgaste encontra-se relacionada com a deficiente ligação entre os componentes da mistura betuminosa, da má formulação das misturas, da utilização de materiais inadequados, de erros de construção ou da contaminação do pavimento por derrame acidental de combustíveis (Pereira e Miranda, 1999; Pinto, J.I.B.R., 2003).

Dentro desta família destacam-se quatro tipos de degradações:

- Desagregação superficial;
- Cabeça de gato;
- Peladas;
- Ninhos (covas).

A desagregação superficial é das degradações mais importantes desta família, caracterizando-se pelo desprendimento, em geral, do agregado mais grosso à superfície do pavimento, ou perda do mástico (finos, filer, e ligante betuminoso).

Na figura 3.6 é evidenciada a desagregação superficial da camada de desgaste de um pavimento flexível.



Figura 3.6 – Desagregação superficial (Interactive, 2008).

A cabeça de gato surge no seguimento da perda da componente mais fina da mistura betuminosa (filer, finos e ligante), deixando saliente os agregados mais grossos, aumentando assim a

macrotextura da superfície. Este tipo de degradação pode ter origem na má qualidade dos materiais constituintes da mistura, deficiente adesividade entre o agregado e o betume e, eventual, deficiente dosagem de ligante.

As condições severas de tráfego, devido às elevadas ações tangenciais desenvolvidas entre os pneus e o pavimento em descidas acentuadas e curvas de raio apertado, contribuem, também, para o desenvolvimento deste tipo de degradação.

A macrotextura, característica deste tipo de degradação, tem como efeitos negativos, para o utilizador, o ruído e o desgaste dos pneus. A evolução natural desta degradação resulta, em parte, na degradação anterior (degradação superficial) (Pereira e Miranda, 1999; Branco et al, 2011).

As peladas correspondem a um desprendimento da camada de desgaste em relação à camada subjacente (Jacinto, M.A., 2003; Branco et al, 2011). Como principais causas deste tipo de degradação podem referir-se a espessura reduzida da camada de desgaste, deficiente ligação entre a camada de desgaste e a camada betuminosa inferior e por fim a falta de estabilidade da própria camada de desgaste. As peladas são vistas, muitas vezes, como sendo um estágio posterior da evolução das fendas parabólicas. Na figura 3.7 é mostrado um exemplo de pelada observada num pavimento flexível.



Figura 3.7 – Formação de pelada (Interactive, 2008).

Os ninhos ou covas são depressões de forma amendoada localizados na camada de desgaste, podendo evoluir para as camadas inferiores (Maia, I.M., 2012). Como possíveis causas do aparecimento deste tipo de degradação são referidas por Pereira e Miranda (1999), a evolução natural da pele de crocodilo e desagregações localizadas da camada de desgaste. Os ninhos ou covas são entendidos como sendo os estádios últimos no processo de degradação do pavimento, apresentando severos efeitos sobre os veículos, sofrendo, por sua vez, a ação acrescida dos

mesmos, contribuindo para uma acelerada evolução da degradação do pavimento. A figura 3.8 apresenta um exemplo de ninho (cova) presente num pavimento.



Figura 3.8 – Ninho ou cova (Pinto, J., 2003 e Figueiredo, N., 2011)

3.6 Movimento de Materiais

O movimento de materiais surge normalmente associado a problemas de drenagem e do fendilhamento das camadas betuminosas. Neste tipo de família destacam-se dois tipos de degradações, a exsudação e a subida de finos (Pereira e Miranda, 1999).

A exsudação resulta da migração excessiva de ligante para a camada de desgaste (figura 3.9), sobretudo na zona de passagem dos rodados dos veículos, conferindo um aspeto negro e brilhante à superfície. Antunes et al (2005) referem como principais causas da exsudação a deficiente composição da mistura betuminosa, contendo excesso de ligante (betume), e/ou ligante de baixa viscosidade e reduzida porosidade devido ao excesso de fração fina dos agregados. Esta degradação será tanto mais grave, quanto menos viscoso for o betume à temperatura ambiente e sob as condições severas de tráfego (pesado e lento).



Figura 3.9 – Exsudação (Interactive, 2008).

A subida de finos observa-se essencialmente quando um pavimento apresenta as camadas betuminosas fendilhadas (Pereira e Miranda, 1999). Na superfície do pavimento podem observar-se manchas de cor esbranquiçada devido à presença de finos, provenientes das camadas granulares e do solo de fundação. Como possíveis causas é de destacar a ineficiência de drenagem, promovendo a ascensão da água através do solo de fundação, arrastando por sua vez os finos e facilidade de circulação da água infiltrada nas camadas granulares através de fendas, sendo a mesma expulsa, aquando da passagem dos veículos e consequente arrastamento dos finos.

3.7 Reparações

Embora a maioria dos autores não considere as reparações uma patologia dos pavimentos, as mesmas, com já foi dito anteriormente, são consideradas como tal pelo “Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários” (EP, 2008).

Segundo Pinto (2003), as reparações são zonas onde ocorrem e evoluem prematuramente várias degradações relativamente ao restante pavimento, classificando-se quanto à qualidade de execução e em função do seu estado.

As reparações (EP, 2008) abrangem a tapagem das covas e os remendos. Sendo a tapagem de covas (figura 3.10) uma reparação de pequena dimensão e de forma irregular, visando tratar os defeitos da superfície, enquanto os remendos (figura 3.11) são reparações de forma definida e regular.

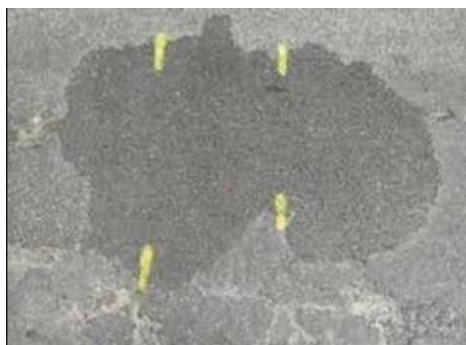


Figura 3.10 – Tapagem de covas (Antunes et al, 2005).



Figura 3.11 – Remendo (Interactive, 2007).

4. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

4.1 Introdução

Os métodos de dimensionamento de pavimentos baseiam-se em metodologias que têm evoluído rapidamente há algumas décadas. No passado, o dimensionamento era feito de forma totalmente empírica, fundamentada no conhecimento prático que tinha por base experiências bem ou mal sucedidas para balizar as novas práticas.

Com a evolução da mecânica dos materiais, sobretudo ocorrida no século XX, passou-se de uma aproximação totalmente empírica para uma aproximação empírico-analítica dos pavimentos rodoviários. Estes visam o entendimento do comportamento dos materiais de pavimentação em função de ensaios de índice, sendo o mais conhecido, o Índice de Suporte Californiano, vulgarmente denominado pela sigla inglesa CBR (*California Bearing Ratio*).

Neste contexto, diversos países reuniram esforços no desenvolvimento de metodologias para o dimensionamento de pavimentos, seguindo várias lógicas em variados graus de complexidade. Campanhas de monitorização de pavimentos rodoviários em serviço formaram, posteriormente, a base para alguns dos mais conhecidos métodos de dimensionamento, introduzindo conceitos, como a qualidade de circulação, de serventia dos pavimentos rodoviários e de comportamentos mecânicos dos materiais.

Só na década de sessenta, do século XX, é que se passou a introduzir o conceito hoje conhecido como dimensionamento de pavimentos mecanístico-empírico, designado por muitos de método racional, o qual analisa o comportamento mecânico dos materiais para descrevê-lo nas análises de projeto.

Enquanto os projetos puramente empíricos são os mais simples e não são capazes de antecipar o comportamento de um pavimento frente a um cenário ainda não testado, os projetos empírico-analíticos permitem aos projetistas a extrapolação de resultados para novos cenários. No entanto, o resultado da extrapolação realizada é normalmente baseado num grande número de hipóteses que podem ou não vir a ser verificadas.

Os projetos empírico-mecanicistas, por sua vez, viram o estabelecimento do comportamento dos materiais de uma forma constitutiva (habilidade de descrever o comportamento do material

através de modelos teóricos de mecânica dos materiais) recorrendo a calibrações para aproximação de modelos teóricos à prática.

Atualmente, tal como acontece no nosso país, o dimensionamento de pavimentos flexíveis é realizado por meio de métodos empírico-mecanicistas, sendo os mais usados o método da Shell e o da Universidade de Nottingham (Lopes, 2009).

É de referir, também, a existência de métodos mais simples e práticos, como o “Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional” (EP – JAE, 1995).

Em seguida, apresentam-se os métodos de dimensionamento vulgarmente distinguidos em dois grupos:

- Métodos empíricos;
- Métodos empírico-mecanicistas.

4.2 Métodos Empíricos

A complexidade do comportamento estrutural dos pavimentos levou, desde muito cedo, à necessidade de recorrer à via experimental, através de construções *in situ*, para obter informações sobre o valor prático das técnicas de construção, dos modelos de comportamento e dos critérios de dimensionamento.

Como já foi referido, foram desenvolvidos vários ensaios em vias existentes e sobre troços experimentais, onde foram simuladas diferentes solicitações, sob diversas condições climáticas. Nesta vertente, os Estados Unidos da América (EUA) realizaram trabalhos de grande relevo, destacando-se os ensaios da WASHO, em 1951, e da AASHO, de 1955 a 1961 (AASHO, 1962). Tais ensaios permitiram tirar conclusões importantes, originando novos métodos de dimensionamento e aperfeiçoamento dos já existentes, constituindo um ponto notável na evolução do dimensionamento de pavimentos. Assim, antes da realização destes ensaios, os métodos de dimensionamento de pavimentos eram essencialmente empíricos (Barbosa, 1984).

Em Barbosa (1984) são abordados os diferentes métodos empíricos desenvolvidos:

- Método CBR (1929);
- Método do Índice de Grupo (1945);
- Método de Hveem (1948);

- Método do Asphalt Institute (1956).

Não sendo objetivo deste trabalho a descrição dos diferentes métodos de dimensionamento de pavimentos, mas sim, de certa forma, compreender o seu processo evolutivo até aos dias de hoje, achando assim, por bem, fazer uma breve abordagem do método CBR, visto ser, o método de dimensionamento empírico mais antigo e conhecido.

O método CBR é atribuído ao engenheiro O.J. Porter do California Division of Highways (CDH), tendo sido o primeiro método de dimensionamento de pavimentos flexíveis criado sobre bases estritamente empíricos (Turnbull et al, 1962).

O método CBR considera, somente, dois fatores: a resistência do subleito, determinado através do ensaio de CBR e o tráfego de projeto. O único mecanismo de falha neste procedimento é a deformação permanente (deflexão excessiva dos materiais sob os pavimentos). Este método, originalmente, aplicava-se unicamente a pavimentos com tratamento superficial ou de revestimentos asfálticos delgados com camadas granulares espessas.

Resumidamente, o método CBR faz uma consideração do tipo *bottom-up* (de baixo para cima), de forma a considerar todas as camadas subjacentes àquela em análise, como uma camada de subleito com o valor do CBR igual ao ensaio de CBR da camada imediatamente abaixo à camada em questão. A espessura da referida camada é, então, determinada através de gráficos empíricos (Figura 4.1), os quais são baseados em equações da seguinte forma geral:

$$h = \frac{C_3}{\sqrt{CBR}} (1 + C_4 \log N_{ESA})$$

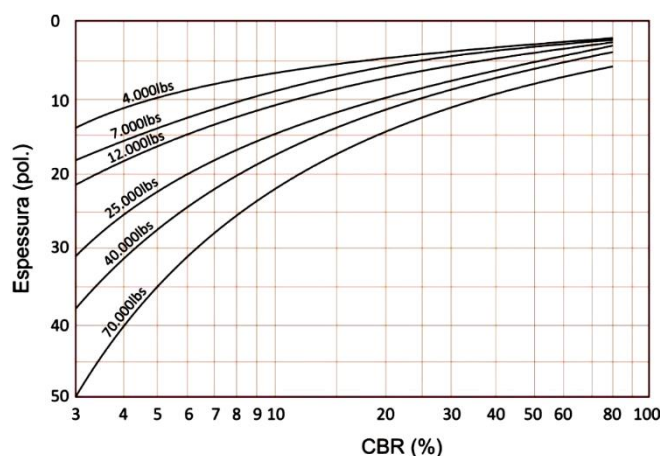


Figura 4.1 – Curvas originais para o projeto de pavimentos aeroportuários em função de CBR (Yodes e Witczak, 1975).

Em geral, todos os métodos de dimensionamento empírico apresentam uma organização semelhante entre si, encontrando-se sob a forma de ábacos, gráficos e catálogos, atendendo às correspondentes especificações dos materiais (Mal, M., 2002).

A sua aplicação consta das seguintes fases:

- Estabelecimento da vida útil (habitualmente 20 anos);
- Determinação dos parâmetros de dimensionamento (caracterização dos solos de fundação (CBR), tráfego de projeto e condições climáticas locais;
- Escolha da solução, mediante os elementos de cada método, citado por Pinto (2003):
 - Ábacos – Método de Sheel (Sheel, 1978)
 - Monogramas – Método AASHO (AASHO, 1986)
 - Tabelas – Método do PCA (Portland Cement Association, 1967)
 - Catálogos de Secções Estruturais – Catálogo do TRL (Road note, 1970).

Como exemplo de catálogos, tem-se no nosso país o “Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional” (EP-JAE, 1995). Este manual propõe um conjunto de estruturas de pavimentos, em fase de estudo prévio, definindo estruturas tipo de pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos. A “catalogação” das diferentes estruturas tipo e respetiva espessura das camadas constituintes, tem por base a associação de diversos tipos de materiais, considerando as condições mais desfavoráveis das classes de tráfego e da fundação.

A grande vantagem do método de catálogos é a sua fácil aplicação e padronização do projeto, facilitando aos órgãos rodoviários dos países que o utilizam uma rápida estimativa orçamental. No entanto, quanto maior for a variabilidade dos materiais, tráfego, condições climáticas e operacionais, mais difícil será fazer um catálogo eficiente.

De acordo com Pinto (2003), a limitação dos métodos empíricos deve-se ao facto das equações de dimensionamento propostos apenas devem ser aplicadas ao mesmo tipo de materiais que estiveram na base das medições realizadas, e em locais onde se verificam as mesmas condições climáticas. Para condições diferentes das que deram origem às equações utilizadas pelo método de dimensionamento (empírico), devem ser feitas várias modificações baseadas no comportamento de pavimentos de experiências anteriores.

4.3 Métodos Empírico-mecanicistas

Após descrição e análise das primeiras investigações, conclui-se que era necessário a utilização de um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, de tal forma que o mesmo fornecesse uma espessura de pavimento compatível com o comportamento dos materiais e, também, das solicitações a que estaria sujeito.

Os métodos empírico-mecanicistas, também conhecidos por analítico-empírico (ou analíticos) utilizam certa teoria para prever as tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima na estrutura do pavimento, e procuram compatibilizá-los com as tensões resistentes dos materiais.

Através deste tipo de análise, tem-se um panorama de funcionamento da estrutura, quando solicitada, possibilitando modificações quanto à natureza dos materiais constituintes, bem como quanto às espessuras das camadas. Ao analisar a estrutura do ponto de vista racional, pode-se alterá-la de modo a proporcionar um desempenho adequado de cada um dos materiais do pavimento, para que o conjunto seja solicitado de forma equilibrada, sem que a solicitação, nas camadas, seja demasiada e provoque precocemente a rotura.

As vantagens da utilização de métodos empírico-mecanicistas no dimensionamento de pavimentos flexíveis são:

- Melhor confiabilidade no projeto;
- Possibilidade de prever defeitos específicos;
- Possibilidade de extrapolação de resultados de laboratório e de campo;
- Maior compatibilização entre custo e benefício das obras;
- Possibilidade de prever as consequências de novas configurações de carregamento;
- Melhor utilização dos materiais disponíveis;
- Possibilidade de se considerar explicitamente os efeitos sazonais.

4.3.1 Princípios do dimensionamento empírico-mecanicista

Os métodos de dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos seguem o mesmo raciocínio aplicado a outras estruturas do domínio da engenharia civil. Os aspetos-chave deste tipo de dimensionamento estão nos modelos de comportamento dos materiais utilizados. Um

procedimento racional pode considerar um simples modelo de comportamento elástico do material, sem considerar as variações das propriedades dos materiais com as ações, até à consideração de um modelo viscoelástico dos materiais asfálticos onde as características dos materiais variam com a intensidade e características das ações.

O dimensionamento pela via racional consiste em determinar o estado de tensão de tração na base de revestimento asfáltico e a deformação de compressão no topo do solo de fundação, sendo estes parâmetros de resposta no dimensionamento dos pavimentos flexíveis. Na figura 4.2 apresenta-se um organigrama típico de dimensionamento de pavimentos flexíveis por esta via.

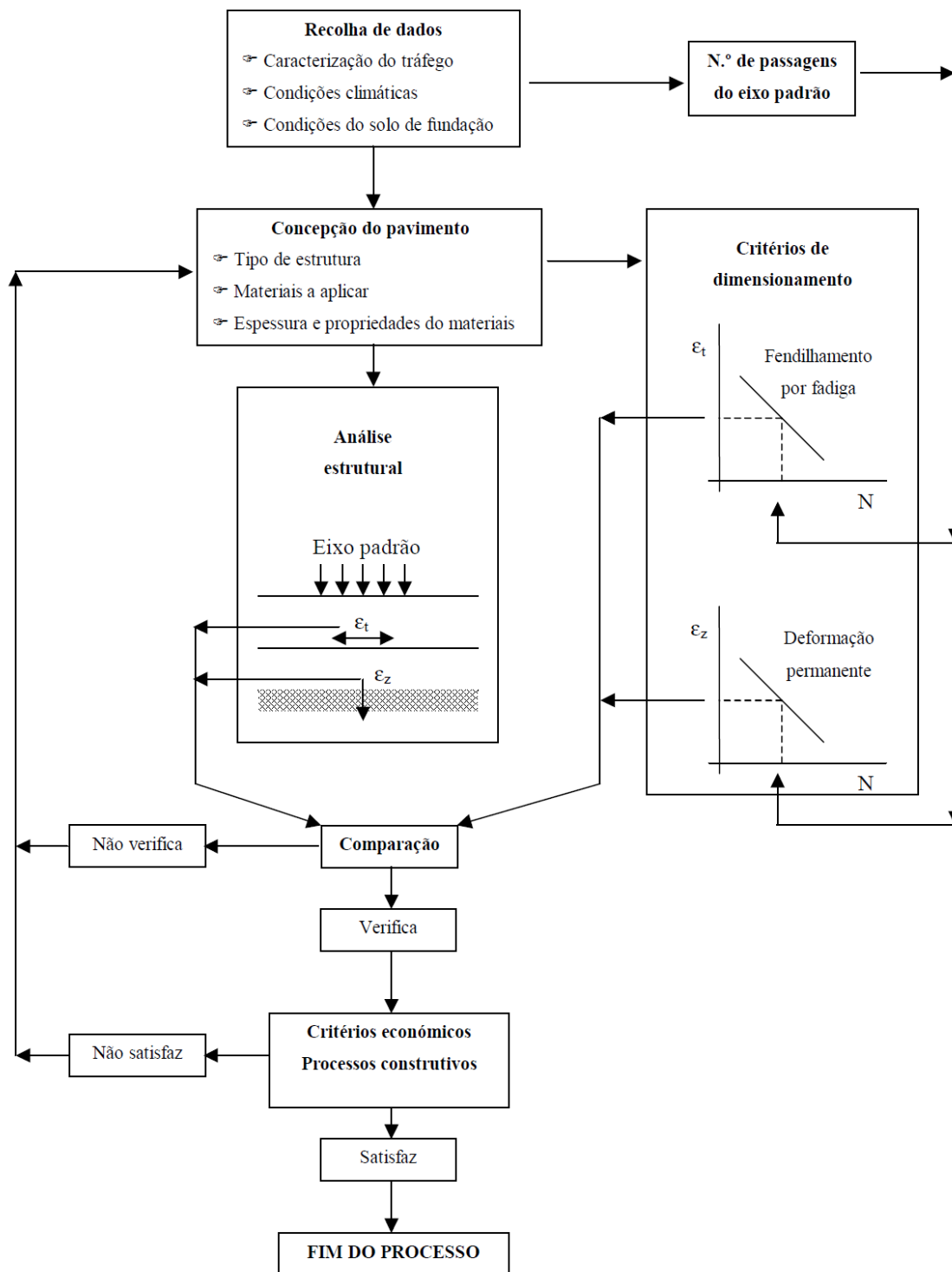


Figura 4.2 – Organigrama do procedimento de dimensionamento analítico-empírico de um pavimento flexível (adaptado de Azevedo, 1993).

De um modo geral, o procedimento de dimensionamento analítico-empírico segue os seguintes passos:

- Reunir dados referentes aos materiais de pavimentação, ao tráfego e às condições climáticas;
- Correlacionar a resistência dos materiais em função das condições climáticas e do tipo de carregamento, admitindo certos modelos de comportamento dos mesmos;
- Escolher a geometria da estrutura (espessura das diferentes camadas) e calcular as tensões e deformações;
- Comparar os valores críticos de tensões e deformações com o dano provocado pela repetição das cargas (critérios de ruína previamente fixados);
- Verificação, quer da geometria, quer dos materiais, até obter um dimensionamento satisfatório;
- Considerar aspetos económicos do resultado obtido (Franco, 2007 e Pinto, 2003).

Este tipo de procedimento de dimensionamento (figura 4.2) é formado por três importantes “subprocessos” sendo eles a análise de tensões e deformações, também denominada de análise estrutural, a verificação dos critérios de ruína, e por fim, a análise económica.

A análise estrutural tem por objetivo o cálculo do estado de tensão e deformação em alguns pontos da estrutura.

Na verificação dos critérios de ruína, é determinado o número acumulado de eixos-padrão admissível, relacionando-o com o número acumulado de passagens de eixo-padrão de projeto, obtendo um dano que deverá ser limitado a 100% para os dois critérios de ruína (fendilhamento por fadiga ou deformação permanente). Se nalguns casos o dano for superior a 100% será necessário alterar a geometria da estrutura ou escolher novos materiais.

Na análise económica pretende-se determinar a solução ótima de dimensionamento em que o dano deverá ser de 100% escolhendo uma nova geometria de outros materiais. Assim, com a existência de várias soluções, faz-se a análise económica das mesmas.

Em LNEC (1971), encontram-se descritos alguns dos métodos empírico-mecanicistas desenvolvidos.

4.3.2 Solicitações

As solicitações a considerar no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis são as provenientes da ação do tráfego, resultando da aplicação das cargas dos veículos, e das ações climáticas, apresentados pela temperatura.

4.3.2.1 Tráfego

A ação do tráfego é essencialmente decomposta em duas componentes, sendo uma delas a ação vertical associada ao peso dos veículos e, outra a ação tangencial devido ao rolamento, aceleração ou travagem. A ação vertical origina esforços de compressão e de tração nas camadas betuminosas devido à flexão dos mesmos e esforços de compressão nas camadas granulares, ficando ainda as duas camadas submetidas a esforços de corte (Silva, 2005).

Para o dimensionamento da estrutura importam as ações verticais, sendo necessário determinar o número acumulado de veículos que irá solicitar o pavimento e as respetivas cargas por eixo (Miranda, 1995), por conseguinte, para efeitos de análise estrutural do pavimento, apenas os veículos pesados são determinantes.

As cargas por eixo dos veículos pesados dependem do tipo de veículo e do tipo de carga, originando grande diversidade de estados de tensão e deformação do pavimento. De modo a incorporar tal variabilidade nos modelos de cálculo, foi desenvolvido o conceito de equivalência ou peso por eixo, ou seja, o efeito de um determinado veículo pesado é convertido no efeito de um único tipo de eixo (eixo-padrão).

Em Portugal, no dimensionamento de pavimentos flexíveis, é recorrente utilizar-se o eixo-padrão de 80kN, pelo facto de ter sido o eixo utilizado no ensaio da AASHO (1962). Pela expressão 4.1 é possível obter o coeficiente de equivalência (γ) entre o dano causado no pavimento, provocado pela passagem de um eixo-padrão de 80kN e o dano provocado por um eixo de peso P.

$$\gamma_i = \left(\frac{K \times P_i}{P_{EP}} \right)^X \quad (4.1)$$

Onde:

γ_i – coeficiente de agressividade dos diversos tipos de eixo;

K – fator que depende do tipo de eixos (1 – para eixos simples; 0,57 – para eixo duplo e 0,55 para eixo triplo);

P_i – Peso do eixo “i” a considerar;

X – fator que depende do tipo de pavimento.

Para pavimentos flexíveis, no seguimento do ensaio da AASHO (1962), o valor da potência (X) utilizado com maior frequência é o quatro. Outros estudos, como por exemplo o projeto FORCE (OCDE, 1991), mostram que (X) varia de 2 a 9 de acordo com o tipo de degradação e severidade considerada.

Estudos mais recentes, no âmbito do protocolo JAE/LNEC (1999), apontam para um expoente de cinco.

Como já foi dito, nesta secção, o eixo-padrão frequentemente adotado no nosso país é o rodado duplo de 80kN ou 130kN, figura 4.4. Segundo alguns métodos de dimensionamento, como por exemplo o método de Sheel (1977) e da AASHO (1986), definem o eixo-padrão como um eixo simples com carga total igual a 80kN, tendo em cada extremo um rodado de duas rodas gémeas (figura 4.3), admitindo uma área de contacto entre o pneu e o pavimento circular de raio (R) e o afastamento entre rodas (L). Conhecida a carga (P) do eixo-padrão, cada roda transmite ao pavimento uma carga $P/4$ uniformemente distribuída pela área de contacto entre o pneu e o pavimento (figura 4.4).

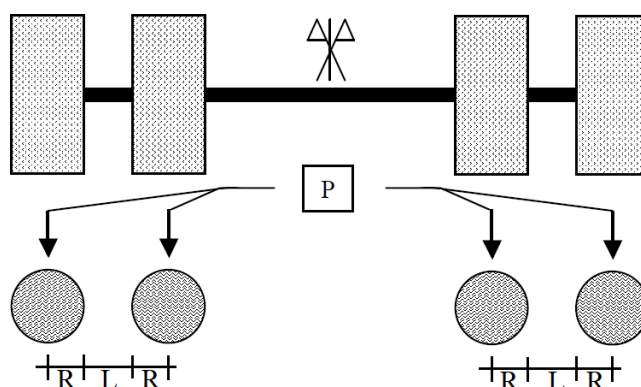


Figura 4.3 – Configuração e esquematização geral adotada para a ação de um eixo-padrão sobre o pavimento (adaptado de Branco et al, 2011 e Oliveira, 2001)

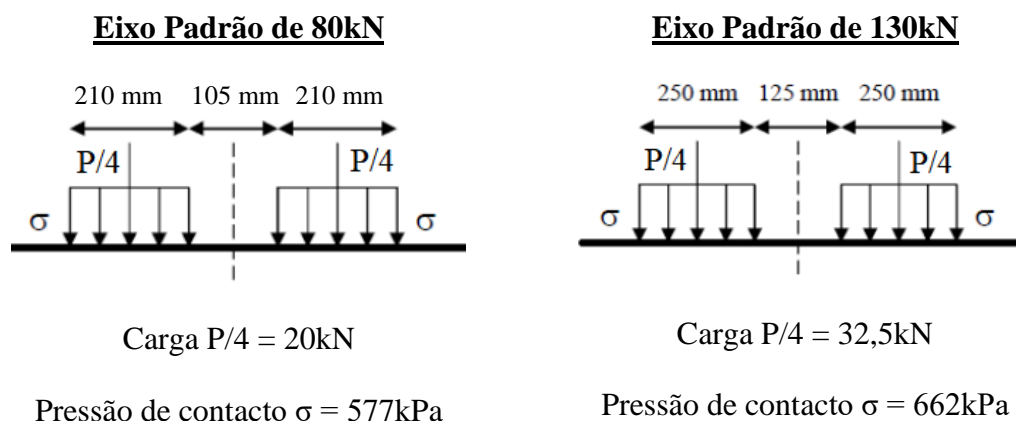


Figura 4.4 – Esquema adotado para os valores das dimensões e das cargas utilizadas nos cálculos com o programa JPav1.1 desenvolvido pelo prof. Jorge C. Pais

Para efeitos de dimensionamento é necessário obter o número de veículos pesados que solicitam a estrada durante a sua vida útil. Sendo geralmente considerado, para pavimentos flexíveis, uma vida útil de 20 anos, a contar desde o ano de abertura ao tráfego. Quanto ao número de veículos pesados, que solicitam a estrada durante a vida útil, deverá ser determinado por meio de métodos de previsão de tráfego, sendo essencial a avaliação de trânsito existente na região onde se vai inserir a nova estrada e prever o tráfego que a mesma irá atrair e a sua evolução até ao fim da sua vida útil (Cunha, 2009 e Lopes, 2008).

Em Portugal, para o conhecimento do tráfego existente e sua evolução recorre-se às estatísticas quinquenais publicadas pelo IEFP (Branco et al, 2011).

Com esses dados, é possível criar modelos capazes de prever o tráfego médio diário anual de veículos pesados ($TMDA_p$) em cada ano de vida da estrada em serviço, assim como da taxa de crescimento anual do tráfego de pesados (t). Assim, pela expressão 4.2 é possível obter o número total de veículos pesados (N_{pes}) que solicitam o pavimento durante o número de anos de vida útil previsível (n).

$$N_{pes} = TMDA_p \frac{(1+t)^n - 1}{t} 365 \quad (4.2)$$

Uma vez conhecido o tráfego total de pesados (N_{pes}), que circula nos dois sentidos durante a vida útil, deve prever-se a sua repartição pelo número de vias que formam a faixa de rodagem, de modo a calcular o tráfego na via que se pretende dimensionar, designada por “via de projeto” (Branco et al, 2011).

Conhecido o tráfego total na via de projeto (N_p), ou seja N_{pes} repartido, pode-se calcular o número de eixos-padrão empregando a expressão 4.1. No entanto, uma vez que a informação do espectro de cargas dos eixos dos veículos pesados que percorrem o território nacional não ser de simples obtenção, dificultando assim um resultado fidedigno capaz de caracterizar a agressividade, é prática corrente usar valores típicos de agressividade, tal como os recomendados pelo Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (EP – JAE, 1995) e que se apresentam na tabela 4.1. Estes valores encontram-se agrupados em intervalos de tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura ($TMDA_p$), por sentido e na via mais solicitada.

Tabela 4.1 – Caracterização do tráfego segundo o MACOPAV (JAE, 1995)

Classe	(TMDA) _p	Taxa de crescimento médio (t)	Pavimentos flexíveis		Pavimentos semi-rígidos	
			Fator de agressividade (e.p./v.p.)	$N_{dim\ 80}$ (20 anos)	Fator de agressividade (e.p./v.p.)	$N_{dim\ 130}$ (20 anos)
T ₇	<50	Estudo específico				
T ₆	50 – 150	3	2	2×10^6	0,5	5×10^5
T ₅	150 – 300		3	8×10^6	0,6	2×10^6
T ₄	300 – 500	4	4	2×10^7	0,7	4×10^6
T ₃	500 – 800		4,5	4×10^7	0,8	7×10^6
T ₂	800 – 1200	5	5	7×10^7	0,9	10^6
T ₁	1200 – 2000		5,5	10^8	1,0	2×10^7
T ₀	>2000	Estudo específico				

Por fim, através da expressão 4.3 determina-se o tráfego acumulado de eixos-padrão de 80kN, durante o período de dimensionamento (N_{80}^{dim}), em função do fator de agressividade, do tráfego médio diário anual de pesados, da taxa de crescimento anual e do número de vida útil do pavimento.

$$N_{80}^{dim} = N_p \alpha \quad (4.3)$$

Onde:

N_{80}^{dim} – número de tráfego acumulado de eixos-padrão;

α – fator de agressividade do tráfego;

N_p – número total acumulado de veículos pesados na via de projeto.

4.3.2.2 Condições climáticas

No dimensionamento de pavimentos, a importância deste ou daquele fator climático depende da localização geográfica de cada país. Geralmente, em Portugal, como nalguns países da Europa, os métodos de dimensionamento focam-se nos efeitos da temperatura e da variação das condições hídricas (Cost 333, 1999).

A presença de água nos pavimentos afeta essencialmente a resistência mecânica das camadas granulares e do solo de fundação, contribuindo, assim, para a deformação permanente das mesmas (Brás, 2012 e Mendes, 2011).

O Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (EP-JAE, 1995) considera que as estruturas de pavimentos sejam providas de sistemas eficientes de drenagem (interna e externa), não comprometendo o seu comportamento mecânico.

A temperatura assume particular importância no dimensionamento de pavimentos flexíveis, uma vez que afeta significativamente o comportamento mecânico das estruturas betuminosas, pois as mesmas apresentam uma rigidez que varia fortemente com a temperatura (Gordete, 2006)

O método mais expedito para considerar o efeito da temperatura nas camadas betuminosas é a consideração de uma “temperatura de serviço equivalente anual”. Picado-Santos (1994) descreve diversas metodologias para avaliação da temperatura equivalente numa mistura betuminosa. No presente trabalho optou-se pela apresentação do método da SHELL (1977), visto ser o mais utilizado em Portugal.

De acordo com o método da SHELL, com base em “temperaturas médias mensais do ar”, para a região em causa, são determinados fatores de ponderação com base no gráfico da figura 4.5, ou por uso da expressão 4.4. A partir de fatores de ponderação de cada um dos meses,

previamente determinados, calcula-se a sua média e utilizando o mesmo gráfico, é obtida a temperatura média anual ponderada.

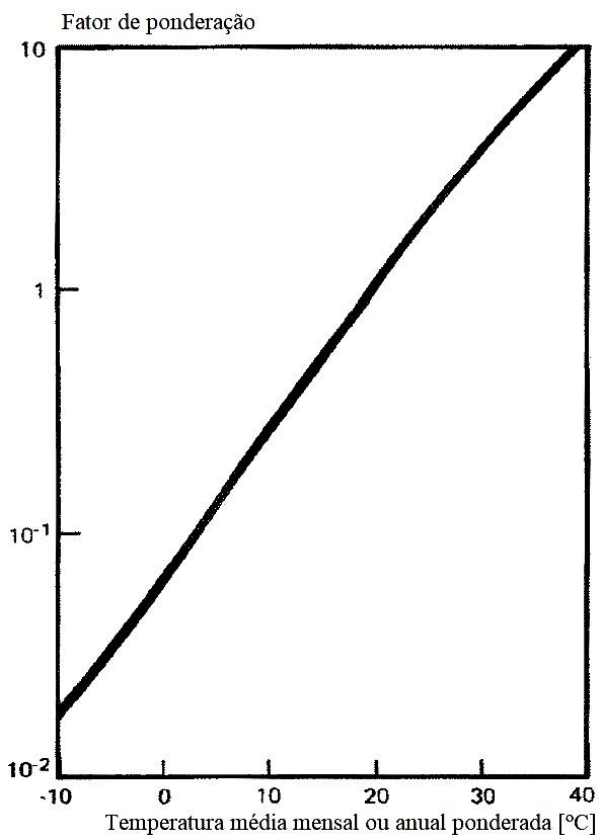


Figura 4.5 – Curva dos fatores de ponderação da temperatura média mensal do ar, método da SHELL (adaptado de Picado-Santos, 1988).

$$W_{fator} = 0,0723 \times e^{TMMA} \quad (4.4)$$

Onde:

W_{fator} – fator de ponderação;

TMMA – temperatura média mensal do ar (°C).

Por fim, a temperatura de serviço a considerar por cálculo das propriedades das misturas betuminosas é determinada através do gráfico apresentado na figura 4.5, em função da espessura da camada em estudo e da temperatura média anual ponderada que entra como abcissa no gráfico (figura 4.6).

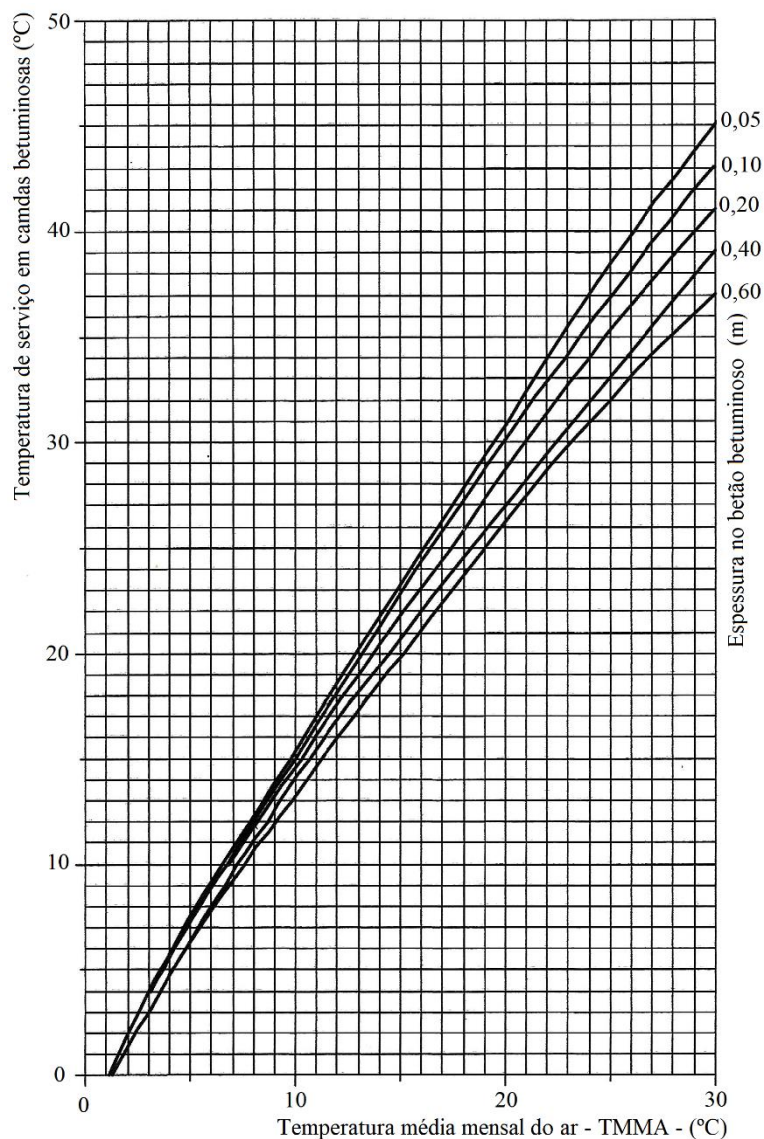


Figura 4.4 – Curva das temperaturas de serviço em misturas betuminosas, método da SHELL (adaptado de Picado-Santos, 1994).

4.3.3 Características Mecânicas dos Materiais

A seguir apresentam-se algumas formas para a previsão das características mecânicas, como o módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson, dos materiais que constituem o pavimento flexível.

4.3.3.1 Solo de fundação

Para uma caracterização adequada do solo de fundação é necessário ter em consideração o seu módulo de deformabilidade, que, por sua vez, depende de importantes fatores como o estado de tensão, características do carregamento, anisotropia, estado de compactidade, grau de humidade, entre outros (Machado, 2013 e Privitera, 1974).

Uma vez que a deformabilidade do solo depende de muitos fatores, e nem sempre é possível efetuar os ensaios necessários à sua caracterização (ensaios triaxiais), é usual recorrer a processos expeditos a partir de propriedades relativamente fáceis de obter, como é o caso das correlações a partir do valor do CBR e de ensaios de carga em placas estáticas (ECP) ou dinâmicas, estes últimos também designados de “Falling Weight Deflectometer” (FWD).

Com base no recurso ao CBR dos solos, alguns autores estabeleceram várias correlações, deduzidas por via empírica, sendo algumas delas ainda utilizadas para caracterizar a resistência do solo, como por exemplo a proposta pela Shell (Sheel, 1985) traduzida pela expressão 4.5.

$$E_f = 10 \times CBR \quad (4.5)$$

Onde:

E_f – módulo de deformabilidade (MPa);

CBR – índice CBR (%).

Outra relação entre o CBR e o módulo de deformabilidade, e também usada em Portugal, foi proposta na Grã-Bretanha (Powell et al, 1984) e é traduzida pela expressão 4.6, também com CBR em percentagem e E_f em megapascals (Branco et al, 2011).

$$E_f = 17,6 \times CBR^{0,64} \quad (4.6)$$

A partir dos resultados dos ensaios de carga em placa (estáticos ou dinâmicos) o módulo de deformabilidade da fundação, E_f , pode ser obtido pela expressão 4.7 (Branco et al, 2011).

$$E_f = \frac{2 \times (1 - \nu^2) \times p \times r}{\delta} \quad (4.7)$$

Onde:

E_f – módulo de deformabilidade (MPa);

p – pressão uniforme aplicada (KPa);

r – raio da placa de carga (mm);

δ – assentamento reversível, de deflexões;

ν – coeficiente de Poisson (frequentemente com valor de 0,45).

No que diz respeito ao coeficiente de Poisson da fundação têm sido propostos vários valores, variando entre 0,35 e 0,45, sendo usual utilizar o valor de 0,35 (Brown et al, 1985). No entanto, o Manual de Concepção de Pavimentos Para a Rede Rodoviária Nacional (EP-JAE, 1995), adota o valor de 0,40. George (2003) recomenda valores compreendidos entre 0,40 e 0,45.

4.3.3.2 Camadas Granulares

O comportamento mecânico de um material granular depende do estado de tensão a que está sujeito, da forma e do tamanho das partículas, do tipo de arranjo entre as partículas, de curva granulométrica do material e do teor em água (Cost 337, 2000; Correia e Harnych, 2002).

O módulo de deformabilidade dos materiais granulares não depende apenas das suas características físicas, mas também de profundidade, ou seja, com o nível de tensão, e da rigidez da camada que lhe serve de apoio (Salt e Stevens, 2002).

Para uma adequada caracterização mecânica deste tipo de materiais deverá recorrer-se a ensaios de laboratório ou *in situ* (Vale, 2004). No entanto, o recurso a ensaios de laboratório (ensaios triaxiais) nem sempre é possível, ou viável, em fase de dimensionamento de um pavimento (Oliveira, 2013). Assim por simplificação, o módulo de deformabilidade das camadas granulares pode ser obtido através de relações expeditas, admitindo que o mesmo depende do módulo da camada subjacente (Antunes, 1993).

Neste sentido, é proposto por Cloessen et al (1997) que o módulo de deformabilidade das camadas granulares, traduzido pela expressão 4.8, é determinado em função do módulo de deformabilidade da fundação (E_f) e da espessura da própria camada granular.

$$E_g = K \times E_f \tag{4.8}$$

Onde:

E_g – módulo de deformabilidade da camada granular (MPa);

$K = 0,2 \times h_g^{0,45}$, sendo h_g a espessura, em mm, da camada granular sobre o solo de fundação;

E_f – módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa).

É indicado por Coessen et al (1977) que os valores de K não devem ser inferiores a 1,5 nem superiores a 4.

Relativamente ao coeficiente de Poisson das camadas granulares, têm sido propostos valores entre 0,30 e 0,40, sendo sugerido por Quaresma (1985) e Brow et al (1985) o valor de 0,30. No Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (EP-JAE, 1995), é adotado para este tipo de camadas o valor de 0,35.

4.3.3.3 Misturas betuminosas

De um modo geral, as características mecânicas das misturas betuminosas são influenciadas por vários fatores, tais como a composição volumétrica, o tipo de betume, a temperatura de serviço e a frequência de aplicação das cargas (Machado, 2013 e Previtera, 1974).

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas é a característica mais condicionante, sendo decisiva no dimensionamento e análise das estruturas de pavimentos flexíveis (Picado-Santos, 1995).

Genericamente os métodos de dimensionamento empírico-mecanicista incluem fórmulas de previsão dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas (Branco et al, 2011), sendo as mais conhecidas as fórmulas apresentadas pelo modelo da SHELL e pelo modelo da Universidade de Nottingham.

Oliveira (2013) enunciou e descreveu os diferentes modelos de previsão do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas.

De acordo com o método da SHELL (1977), a previsão do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas (E_m), depende da rigidez do betume (S_b), que define a sua relação entre tensão e extensão sob determinadas condições de temperatura e do tempo de carregamento.

A determinação da rigidez do betume (S_b) pode ser feita através do ábaco proposto por Van der Poel (1954), desenvolvido a partir de resultados experimentais. Com base no conhecimento do tempo de carregamento, da temperatura de serviço e das características do betume, como a temperatura anel e bola e índice de penetração, a obtenção da rigidez do betume (S_b) é direto conforme se mostra na figura 4.7.

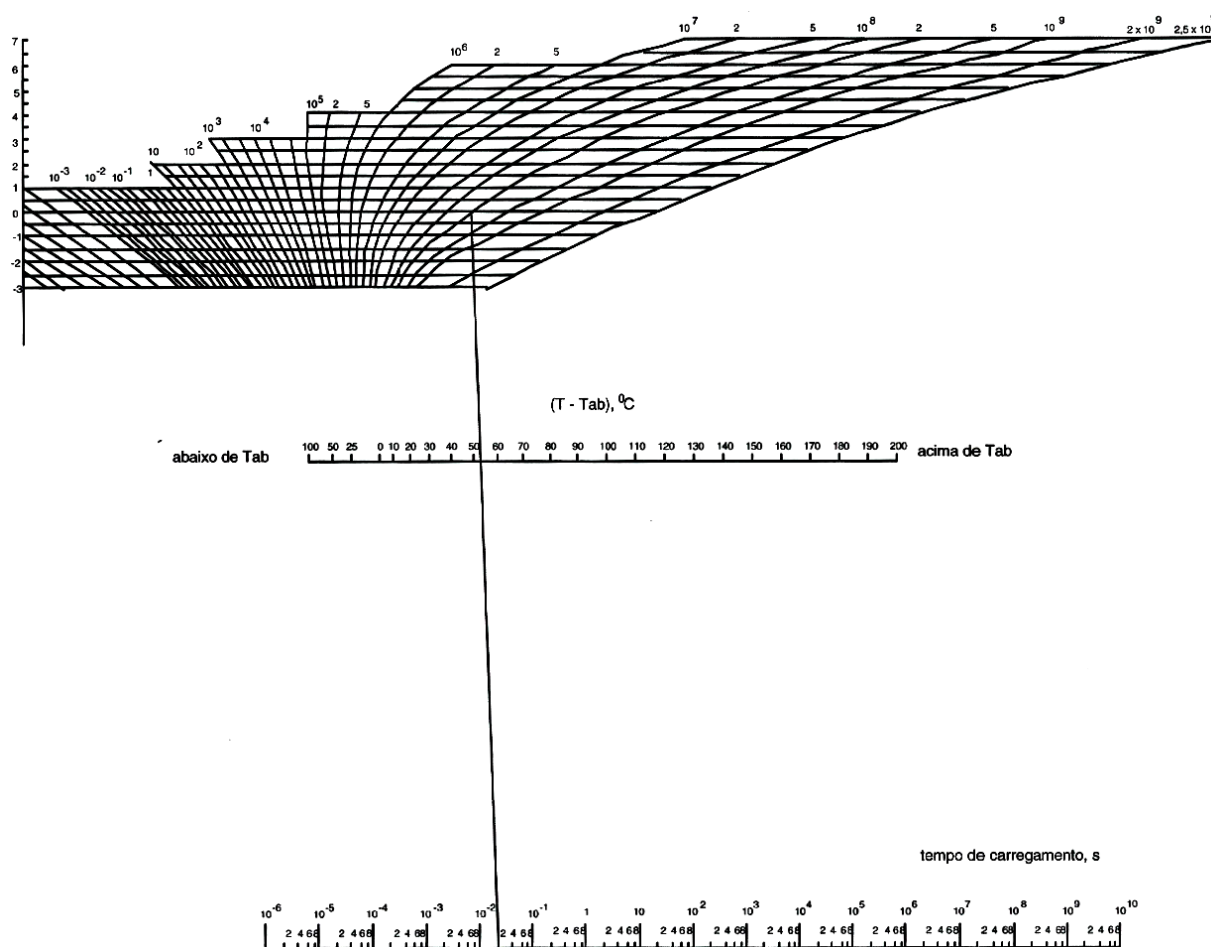


Figura 4.7 – Ábaco de Van der Poel para determinação da rigidez do betume (adaptado de Picado-Santos, 1995, e de SHELL, 1977).

Como alternativa ao ábaco de Van der Poel, o módulo de rigidez do betume (S_b) pode ser obtido pela expressão 4.9, proposta por Ullidtz (1979).

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \times t_c^{-0,368} \times 2,718^{-IPen} \times (Tab - T)^5 \quad (4.9)$$

Onde:

S_b – Módulo de rigidez do betume (MPa);

t_c – tempo de carregamento (S);

$IPen$ – índice de penetração do betume (10^{-1} mm);

Tab – temperatura de amolecimento ($^{\circ}$ C) pelo método de anel e bola;

T – temperatura de serviço a que se encontra o material ($^{\circ}$ C).

O $IPen$ pode ser determinado pela expressão 4.10 desenvolvida por Pfeiffer e Van Dormel (1985).

$$IPen = \frac{20 \times Tab + 500 \times \log(\text{pen}25) - 1955,55}{Tab - 50 \times \log(\text{pen}25) + 120,15} \quad (4.10)$$

Onde:

Tab – temperatura de amolecimento ($^{\circ}$ C) pelo método de anel e bola;

$\text{pen}25$ – penetração de betume a 25° C (10^{-1} mm).

A expressão 4.9, proposta por Ullidtz (1979), para determinar o módulo de rigidez do betume, só é válida nas seguintes condições:

$$20^{\circ}\text{C} \leq (Tab - T) \leq 60^{\circ}\text{C};$$

$$0,015 \leq t_c \leq 0,15;$$

$$- 1 \leq IPen \leq 1.$$

De acordo com Santos (2009), a caracterização do betume deve corresponder à situação de serviço, ou seja, depois de ter ocorrido um certo endurecimento associado ao fabrico e colocação em obra das misturas. Para estimar as características do betume “em serviço”, pode adotar-se de uma forma aproximada, as expressões 4.11 e 4.12, deduzidas para condições inglesas (Kennedy, 1985), verificando algumas situações em Portugal.

$$\text{pen}25_r = 0,65 \times \text{pen}25 \quad (4.11)$$

$$Tab_r = 99,13 - 26,35 \times \log(\text{pen}25_r) \quad (4.12)$$

O índice “r” significa que a grandeza se refere a betume recuperado de misturas em serviço, em que já ocorreu envelhecimento do mesmo.

O tempo de carregamento (t_c) para camadas betuminosas entre os 10 e os 35cm (Oliveira, 2013), pode ser calculado pela expressão 4.13, dependendo apenas da velocidade média da corrente do tráfego pesado (UN, 1986).

$$t_c = \frac{1}{v_t} \quad (4.13)$$

Onde:

t_c – tempo de carregamento (S);

V_t – velocidade média do tráfego pesado (Km/h).

No método da Shell (Bonnaure et al, 1977), a estimativa do módulo de deformabilidade (E_m), para uma rigidez de betume (S_b), pode ser efetuada segundo as expressões 4.14 e 4.15.

$$E_m = 10^A, \text{ para valores de } S_b \text{ entre 5Mpa e 1000MPa} \quad (4.14)$$

$$E_m = 10^B, \text{ para valores de } S_b \text{ entre 1000Mpa e 3000MPa} \quad (4.15)$$

Os expoentes A e B das expressões 4.14 e 4.15 são obtidos por meio das expressões 4.16 e 4.17.

$$A = \frac{589+568}{2} \times (\log S_b - 8) + \frac{589-568}{2} \times |\log S_b - 8| + S_m 108 \quad (4.16)$$

$$B = (S_m 3109 - S_m 108 - 589) \cdot \frac{\log S_b - 9}{\log_3} + S_m 108 + 589 \quad (4.17)$$

Sendo as variáveis das expressões 4.16 e 4.17 obtidas da seguinte forma:

$$S_{89} = 1,12 \times \frac{(S_m 3109 - S_m 108)}{\log_{30}} \quad (4.18)$$

$$S_{68} = 0,6 \times \log \frac{1,37 \times v_b^2 - 1}{1,33 \times v_b - 1} \quad (4.19)$$

$$S_m 3109 = 10,82 - \frac{1,342 \times (100 - v_a)}{v_a + v_b} \quad (4.20)$$

$$S_m108 = 8 + 5,68 \times 10^{-3} \times v_a + 2,35 \times 10^{-4} \times v_a^2 \quad (4.21)$$

Onde:

E_m – módulo de deformabilidade das misturas betuminosas (Pa);

S_b – rigidez do betume (Pa);

v_a – coeficiente do volume do agregado pelo volume total (%) de percentagem volumétrica do agregado;

v_b - coeficiente do volume de betume pelo volume total (%) de percentagem volumétrica de betume.

Para valores de S_b inferiores a 5MPa a expressão 4.14 deixa de ser válida, visto corresponder a comportamento não linear, devendo as propriedades mecânicas ser obtidas por meio de ensaios laboratoriais.

Para valores de S_b inferiores a 3000MPa, a mistura é exequível, e daí o limite apresentado para a aplicação da expressão 4.16 (Picado-Santos, 1995).

Sendo o módulo de deformabilidade das camadas betuminosas a característica mais condicionante, como já foi referido, não há, normalmente, grande preocupação de rigor para a escolha do coeficiente de Poisson (Branco et al, 2011).

Como valores correntes, do coeficiente de Poisson, para misturas betuminosas são encontrados valores entre 0,35 e 0,45 (Vale, 2004).

Por Collop e Cebon (1995) são também indicados valores da mesma ordem, no entanto para temperaturas baixas, em situações correntes, admitem valores da ordem dos 0,15.

Por Quaresma (1985), para análises efetuadas com materiais portugueses, é proposto 0,35 como valor do coeficiente de Poisson para camadas betuminosas, sendo o mesmo valor adotado pelo Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (EP-JAE, 1995).

4.3.4 Modelo de Comportamento Estrutural

Para se proceder ao dimensionamento de uma estrutura é necessário idealizar o comportamento da mesma, de forma que seja possível estudar a resposta das ações a que a estrutura está sujeita.

A idealização do comportamento é feita recorrendo a teorias de modelação estrutural. Estes modelos, no caso de pavimentos, permitem determinar tensões, deformações e deslocamentos na sua estrutura e respetiva fundação, devido às cargas induzidas pelo tráfego (Antunes, 1993).

Existem vários modelos para avaliar o comportamento da estrutura de um pavimento face às ações rolantes, como por exemplo Modelo Elástico Multicamada, Modelos Viscoelásticos e Elásticos não Lineares, entre outros.

No âmbito deste trabalho serão abordados o Modelo Elástico Multicamada e os Modelos Viscoelásticos e Elásticos não Lineares. É abordado o primeiro, por ser habitualmente usado na análise estrutural de pavimentos flexíveis, para efeitos de dimensionamento (Antunes, 2005), sendo vários os programas de cálculo automático que implicitamente adotam este modelo, como por exemplo o ALIZE desenvolvido na LCP (França), ELSYM5 desenvolvido pela Universidade de Berkeley (EUA) e o BISAR desenvolvido pela SHELL, citado por Brás (2012). A razão da segunda abordagem surge por ter em conta o comportamento não linear dos materiais granulares e simularem o comportamento viscoelástico das camadas betuminosas (Oliveira, 2001).

4.3.4.1 Modelo Elástico Multicamada

A estrutura de um pavimento flexível é apresentada por um meio estratificado, submetido a um carregamento superficial distribuído numa área circular, podendo ser modelado por meio da Teoria da Elasticidade (Franco, 2007). Na figura 4.8 representa-se esquematicamente a forma mais comum de um pavimento e as principais tensões, deformações e deslocamentos atuantes no interior da estrutura.

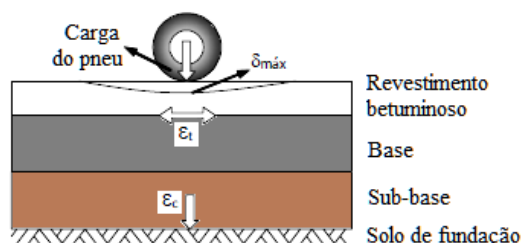


Figura 4.8 – Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos nos pontos críticos de um pavimento flexível (adaptado de Franco, 2007).

Uma vez conhecidas as características da estrutura e dos materiais constituintes do pavimento, como a espessura das camadas, os modelos de deformabilidade, coeficiente de Poisson e a carga

aplicada, pode estimar-se a resposta do pavimento através do cálculo das tensões e deformações geradas na estrutura.

Burmister (1943), a partir da teoria de Boussinesq (1885), apresenta um modelo para determinar tensões e deformações em sistemas de duas e três camadas, sendo mais tarde generalizado para n camadas.

No modelo de Burmister, o pavimento é assimilado a um conjunto de camadas horizontais, contínuas, constituídas por materiais de comportamento homogêneo, isotrópico e elástico linear, assente sobre um meio semi-infinito de Boussinesq, em que na camada superior atua uma carga vertical uniformemente distribuída, P , numa área circular de raio r . As camadas são caracterizadas por um módulo de elasticidade (E) e um coeficiente de Poisson. Na figura 4.9 mostra-se esquematicamente o modelo de Burmister.

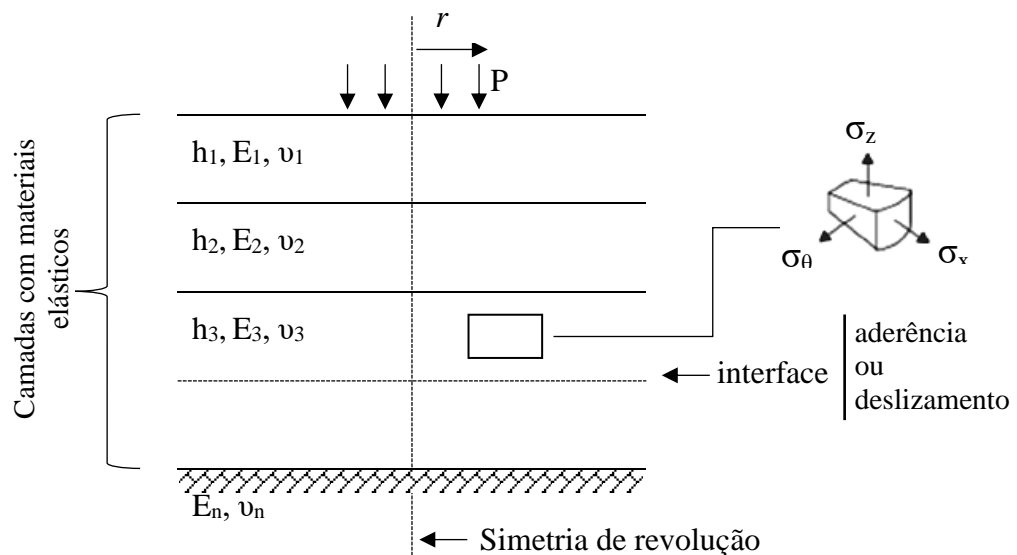


Figura 4.9 – Modelo de Burmister (adaptado de Jacinto, 2003)

O conjunto de equações de Burmister fornece as tensões e deformações localizadas em qualquer ponto das camadas, conforme as expressões 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27 (Medina e Mota, 2005; Oliveira, 2001).

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right) \quad (4.22)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \quad (4.23)$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left((2 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \quad (4.24)$$

$$T_{rz} = T_{zr} = \frac{\partial}{\partial r} \left((1 - \nu) \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \quad (4.25)$$

$$\mu = -\frac{1+\nu}{E} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \right) \quad (4.26)$$

$$\omega = \frac{1+\nu}{E} \left((1 - \nu) \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \quad (4.27)$$

Onde:

ϕ – função de tensão pretendida⁽¹⁾;

∇^2 – operador Laplaciano em coordenadas cilíndricas;

σ – tensões;

μ - deslocamento horizontal;

ω – deslocamento vertical.

⁽¹⁾ A função de tensão satisfaz equações de compatibilidade. Possui constantes que são determinadas para as condições de interface e para a distribuição de carga superficial (Sousa, L., 2011).

Embora seja o modelo utilizado pela maioria dos programas de cálculo automático, a aplicação da teoria da elasticidade a estruturas de múltiplas camadas de Burmister é alvo de algumas “críticas”.

A consideração de materiais homogêneos, isotrópicos e de comportamento elástico e linear não é uma hipótese adequada ao estudo de pavimentos, pois os materiais que os constituem apresentam comportamento não linear, particularmente os materiais granulares não tratados.

O módulo de deformabilidade dos solos e dos materiais granulares depende do nível de tensão aplicada. No modelo de Burmister não é possível incluir este tipo de comportamento, em que se pretenda incluir a não linearidade dos materiais (Pais, 1999).

Outra crítica apontada é o aparecimento, como resultado de cálculo, a tensão de tração na base das camadas granulares, sendo este tipo de tensão pouco credível, visto tratar-se de camadas sem qualquer tipo de aglutinante (Oliveira, 2001).

4.3.5 Critérios de ruína

Após o pré-dimensionamento do pavimento é necessário verificar o seu funcionamento estrutural. Tal verificação é efetuada aplicando modelos de desempenho de pavimentos associados a critérios de ruína. Em geral, e segundo as metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis abordados em Portugal e na maior parte dos países da Europa, são considerados dois critérios de ruína, sendo um deles o critério de fadiga e o outro o critério de deformação permanente (Cost 333, 1999).

Os critérios de ruína retratam os fenómenos considerados nos métodos de dimensionamento de pavimentos, correspondendo aos limites máximos de extensão de tração (ϵ_t), de compressão vertical (ϵ_{dp}) nas camadas ligadas e na fundação, respetivamente (Santos, M., 2009).

Existem vários processos que conduzem ao estabelecimento da resistência à fadiga e à deformação permanente (Branco et al, 2011), no entanto, no âmbito deste trabalho, apenas vão ser descritas as leis adotadas pelo método da Shell (Claessen et al, 1977).

4.3.5.1 Fendilhamento por Fadiga

O critério de fendilhamento por fadiga consiste na análise de fendilhamento excessivo, com início nas zonas tracionadas das camadas betuminosas, controlado pela extensão radial de tração (ϵ_t), na base das camadas betuminosas (Branco et al, 2011), conforme esquematizado na figura 4.14.

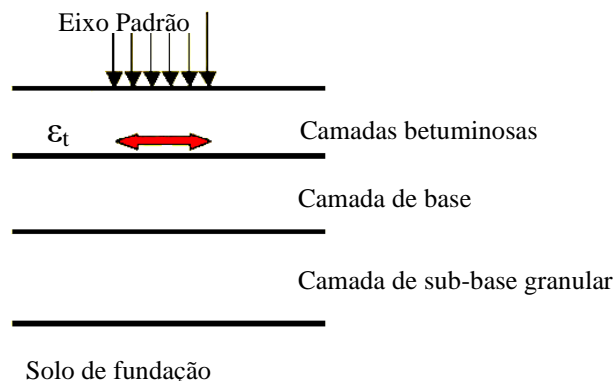


Figura 4.14 – Representação esquemática do ponto crítico onde ocorre a rotura por fadiga à tração (adaptado Minhoto, apontamentos aulas IT, 2014 - IPB)

De acordo com o método da Shell, a expressão usada para a relação entre a extensão radial de tração (ϵ_t) e a vida útil do pavimento (N) para verificação do critério de comportamento à fadiga é traduzida por 4.30.

$$\epsilon_t = (0,856 \times v_b + 1,08) \cdot E_m^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (4.30)$$

Onde:

ϵ_t – extensão de tração (adimensional);

N – resistência à fadiga (nº de eixos-padrão);

v_b – percentagem volumétrica de betume no volume total;

E_m – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa).

Para ajustar os resultados à realidade, segundo a Shell (Claessen et al, 1997) é necessário proceder os seguintes ajustamentos:

- Distribuição lateral do tráfego: deve multiplicar-se a vida útil por 2,5;
- Efeito benéfico de períodos de repouso entre carregamentos: para misturas densas com grande teor em betume deve multiplicar-se a vida útil por 10 e para misturas abertas e pobres em betume deve multiplicar-se a vida útil por 1,25;
- Influência dos gradientes de temperatura: deve dividir-se a vida útil por 2 no caso de temperaturas altas e/ou camadas betuminosas espessas.

4.3.5.2 Deformação permanente

O critério de deformação permanente consiste na análise do assentamento excessivo da superfície do pavimento controlado pela extensão vertical de compressão (ϵ_{dp}), no topo do solo de fundação (Branco et al, 2011), figura 4.15.

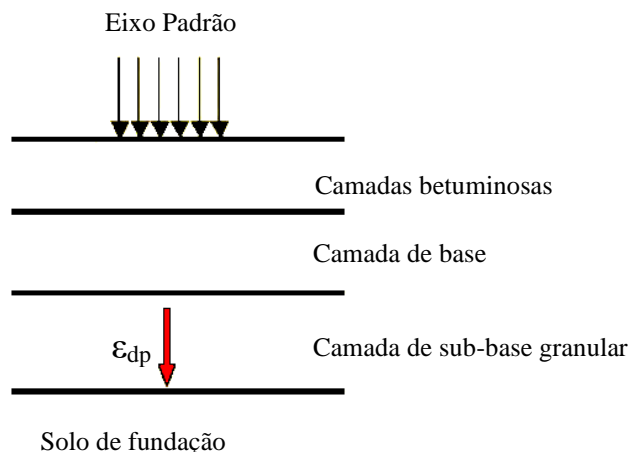


Figura 4.15: Representação esquemática do critério de deformação permanente (apontamentos aulas IT, 2014 - IPB)

Segundo o método da Shell, a expressão usada para a relação entre a extensão vertical de compressão (ϵ_{dp}) e a vida útil do pavimento (N) para a verificação do critério de deformação permanente é traduzida pela expressão 4.31, tendo por base os resultados da AASHO Road Test (HRB, 1962).

$$\epsilon_{dp} = K_S \times N^{-0,25} \quad (4.31)$$

Onde:

ϵ_{dp} – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional);

N – resistência à deformação permanente (nº de eixos-padrão);

K_S – parâmetro que depende a probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento, em que toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,10 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%.

Na versão total do método da Shell, o mesmo faz a verificação complementar à deformação permanente, para considerar a influência das camadas betuminosas em períodos de comportamento não linear. No entanto, quando se verifica o critério de deformação permanente traduzido pela expressão 4.31, admite-se que o assentamento total é apenas devido à contribuição do solo de fundação. Assim, para ultrapassar esta questão, sem que seja necessária qualquer verificação complementar adota-se uma probabilidade de sobrevivência elevada (95%) (Branco et al, 2011; Santos, M., 2009; Simões, J.A., 2008).

5. VARIÁVEIS DE PROJETO E DE OBRA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

5.1 Introdução

Os pavimentos estão sujeitos a condições adversas, como o volume de tráfego que varia durante o seu período de vida e as condições climáticas que influenciam fortemente as propriedades mecânicas dos pavimentos. No dimensionamento dos pavimentos considera-se o efeito conjunto das ações, quer do tráfego quer da temperatura.

Em estudo realizado por Oliveira (2001), é destacada a influência de um conjunto de variáveis que influenciam a durabilidade dos pavimentos. Tais variáveis podem ser agrupadas em dois grupos: o grupo das variáveis de projeto, consideradas na fase de concepção; e o grupo das variáveis de obra, consideradas durante a fase de construção da infraestrutura.

No grupo das variáveis de projeto (Quadro 5.a), encontram-se todos os elementos necessários para o projetista determinar as propriedades mecânicas dos materiais a aplicar e fixar os critérios de dimensionamento.

O grupo das variáveis de obra (Quadro 5.b), compreende os aspetos relacionados com a aplicação em obra e com as possíveis variações dos valores admitidos como ótimos para as misturas betuminosas.

Quadro 5.a – Variáveis de Projeto <i>(adaptado de Oliveira, 2001)</i>	Quadro 5.b – Variáveis de Obra <i>(adaptado de Oliveira, 2001)</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Tráfego médio diário de veículos pesados (TMDP) • Fator de agressividade • Velocidade de circulação • Condições climáticas 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade geral dos materiais • Betume • Agregados • Porosidade/compactação • Condições de aplicação

De acordo com Oliveira (2001), a inclusão das variáveis em cada um dos grupos é feita tendo em consideração a fase onde é suscetível ocorrer a sua variação/determinação.

5.2 Influência das variáveis de projeto

O tráfego e as condições climáticas são aspectos primordiais que condicionam o dimensionamento. Para dimensionar um pavimento, o projetista necessita conhecer as propriedades dos materiais a utilizar, a distribuição da temperatura ao longo do tempo no local onde se vai implantar a futura infraestrutura, a previsão do número de veículos esperados durante a vida útil, respetivo espectro de cargas por eixo e velocidade de circulação dos veículos.

O dimensionamento, passa pela previsão do seu comportamento para um futuro distante (vida útil, 10 ou 20 anos), pelo que a ausência de cenário e variabilidade das premissas é uma realidade constante, tornando o risco associado às variáveis de projeto incontornável e intrínseco ao processo de dimensionamento (Oliveira, 2001).

De acordo com o estudo desenvolvido por Oliveira (2001), as variáveis temperatura e frequência (velocidade de circulação), dentro dos fatores de projeto, assumem um peso relativo sobre o desempenho da estrutura na ordem dos 77% a 90% e 10% a 23% respetivamente. No mesmo estudo, Oliveira (2001), constata que à medida que a temperatura diminui, o módulo de rigidez das misturas betuminosas aumenta, melhorando a capacidade resistente do pavimento. Constata ainda, que o aumento da frequência influencia positivamente o comportamento da estrutura, traduzido por um aumento do módulo de rigidez das misturas betuminosas. Por sua vez, o aumento da temperatura e a diminuição da frequência são prejudiciais ao desempenho das misturas betuminosas, quer ao nível da fadiga por tração quer ao nível das deformações permanentes.

A variação na frequência é mais gravosa, do ponto de vista da deformação permanente, nas estruturas destinadas ao tráfego elevado e tráfego médio, ou seja, nas estruturas com maiores espessuras de camada betuminosa. Nas estruturas com menores espessuras de mistura betuminosa (estruturas destinadas a tráfego reduzido) a variação da frequência de cálculo é igualmente sentida, quer se considere como critério a deformação permanente quer se considere o fendilhamento por fadiga (Oliveira, 2001).

No que respeita à variável temperatura, o risco inerente à escolha de determinada temperatura média do ar é maior para temperaturas mais elevadas. Oliveira (2001), conclui que a influência da temperatura, tanto para estruturas destinadas a tráfego elevado como nas estruturas destinadas a tráfego médio, é igualmente sentida, considerando o critério da fadiga por tração. Nas estruturas destinadas a tráfego reduzido a influência da temperatura é menos expressiva,

no entanto apresenta valores idênticos, quer no critério da deformação permanente quer no critério da fadiga por tração.

5.3 Influência das variáveis de obra

Independentemente do tipo de pavimento a construir, devem ser garantidos determinados critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução.

Na fase de construção do pavimento, a incerteza resulta da variabilidade inerente aos materiais empregues, das condições de aplicação e espessura das camadas (Oliveira, 2013).

No que respeita aos fatores de obra (fase de execução), a sua variabilidade pode ser limitada durante o processo construtivo, sendo assim o risco inerente à sua variação controlável e extrínseco ao processo de dimensionamento.

Em estudo realizado por Oliveira (2001), destaca três fatores preponderantes que durante a execução do pavimento afetam a sua durabilidade, sendo eles a percentagem de betume e percentagem de filler, depreendendo-se por razões económicas, uma vez que são os componentes mais dispendiosos das misturas betuminosas e onde os desvios são mais frequentes, e por fim o grau de compactação, por razões técnicas, uma vez que dificilmente se consegue atingir *in situ* um grau de compactação idêntico ao obtido em laboratório.

No mesmo estudo, Oliveira (2001) evidencia, quer do ponto de vista da deformação permanente quer do ponto de vista da resistência à fadiga por tração, que a percentagem de betume é o fator que assume maior importância na transposição das condições projetadas para a obra, seguindo-se a porosidade das misturas betuminosas e por fim a percentagem de filler, com um peso relativo na ordem dos 52% a 77%, 20% a 45% e 0% a 19% respetivamente.

Do ponto de vista da deformação permanente, o aumento da percentagem de betume faz com que o número de eixos-padrão que o pavimento suporta diminua, sendo as camadas de macadame e de desgaste as mais sensíveis às variações percentuais de betume, por sua vez, a camada de regularização, quando assume uma posição intermédia, ou seja quando se encontra disposta entre a camada de desgaste e a camada de macadame (estrutura típica para tráfego elevado) é a menos sensível às variações percentuais de betume. Em estruturas destinadas a tráfego médio, formadas por camadas betuminosas de desgaste e regularização, as variações da percentagem de betume, no sentido positivo, são em geral, mais gravosas ao nível da camada

de desgaste que ao nível da camada de regularização. Nas estruturas destinadas a tráfego reduzido, sendo apenas a camada de desgaste formada por mistura betuminosa, do ponto de vista da deformação permanente, o aumento da percentagem de betume prejudica o desempenho da estrutura (Oliveira, 2001).

Do ponto de vista da fadiga por tração (Oliveira, 2001) o aumento da percentagem de betume também é prejudicial ao desempenho da estrutura, exceto nas camadas betuminosas inferiores, cuja variação percentual de betume no sentido positivo é francamente benéfica ao desempenho estrutural.

A diminuição do grau de compactação (Oliveira, 2001) de uma mistura betuminosa influencia negativamente o desempenho da estrutura, sendo traduzido por um aumento da porosidade e conseqüente diminuição da área de contacto entre as partículas constituintes da mistura betuminosa. Doravante, neste trabalho, será usado o termo “grau de compactação”, para designar os efeitos da porosidade e do aumento/diminuição da área de contacto entre as partículas constituintes da mistura betuminosa, para a análise dos aspetos propostos neste estudo.

Oliveira (2001) demonstra que a variação do grau de compactação, quer na fadiga por fendilhamento quer no critério da deformação permanente, é mais prejudicial ao nível da camada de macadame, seguindo-se a camada de desgaste e por fim a camada de regularização. A variação do grau de compactação, dentro dos limites do caderno de encargos, provoca uma redução de quase 50% do número de eixos-padrão quando é feita ao nível da camada de macadame.

No que respeita à percentagem de filler, qualquer que seja o critério considerado, fadiga por fendilhamento ou deformação permanente, o aumento do mesmo é benéfico para o desempenho da estrutura, embora pouco significativo (Oliveira, 2001). As variações da percentagem de filler são mais sentidas ao nível da camada de desgaste, quer do ponto de vista da deformação permanente quer da fadiga por tração.

6. ESTUDO DE CASO

6.1 Introdução

No presente capítulo, numa primeira fase, começa-se por fazer uma descrição/levantamento das premissas consideradas, em sede de projeto, no dimensionamento das camadas betuminosas a levar a cabo na beneficiação da E.N 221 entre os Kms 56+200 (Castelo Branco) e Kms 79+100 (Cruzamento com a E.N 220), numa extensão de 19 900 metros.

Numa segunda fase, efetua-se o tratamento e apresentação dos resultados paramétricos das amostras efetuadas às camadas betuminosas durante a sua aplicação em fase de obra (*in situ*).

Após caracterização das amostras efetua-se uma análise de sensibilidade às variáveis, analisadas nas amostras, de modo a perceber o seu efeito sobre a estrutura do pavimento.

Por fim, estabelece-se uma comparação entre o número de eixos padrão admissíveis pela amostra em análise e o número de eixos padrão admissível pela solução projetada.

Numa terceira fase apresenta-se o levantamento das degradações existentes, à data do estudo, em cada trecho analisado, de modo a estabelecer alguma relação entre os valores paramétricos de cada amostra estudada e as degradações observadas.

Numa quarta e última fase procede-se à caracterização estatística das variáveis em estudo, comparado os valores obtidos *in situ* com os valores previstos em estudo e com os valores previstos no Caderno de Encargos.

6.2 Premissas de Projeto

De acordo com a memória descritiva e justificativa da beneficiação da E.N 221 (Kms 56+200 a 76+000), o pavimento existente é um macadame hidráulico antigo com espessura média na ordem dos 9cm, selado com revestimento superficial betuminoso e módulo de deformabilidade na ordem dos 110MPa. Os solos de fundação são xistos, tendo sido adotado um valor de CBR de projeto de 10%, após realização de ensaios. É de salientar que o módulo de deformabilidade considerado para a camada de base, de apenas 110MPa, é substancialmente baixo, quando comparado com o módulo de deformabilidade do solo de fundação, esperando teoricamente um valor superior para o módulo de deformabilidade da camada de base. Sendo a camada de base

considerada o macadame hidráulico existente, podendo estar em avançado estado de degradação, por utilização dos veículos, poderá ser uma das possíveis causas para a sua reduzida capacidade de suporte considera.

O Tráfego médio diário de pesados (TMDP) foi admitido que seria superior a 230, tendo sido considerado uma taxa de crescimento de 3%, prevendo em $3,4E+5$ o número acumulado de passagens equivalentes de eixo padrão no período de vida de 10 anos, normal em projeto de grande beneficiação.

Recorrendo à lei de fadiga preconizada pela “Shell”, para o número acumulado de eixos padrão de $3,4E+5$, resulta uma extensão vertical à superfície do solo de fundação de $745E-6$. Na verificação estrutural do reforço atual do pavimento foi considerado um eixo padrão de 130kN.

A estrutura do pavimento idealizada em projeto, capaz de satisfazer a extensão vertical ($745E-6$), prevista à superfície do solo de fundação, tem as seguintes características:

- Camada de desgaste (BB-D):
 - Espessura 6cm;
 - Módulo de deformabilidade 4600MPa;
 - Coeficiente de Poison 0,40.

- Camada de regularização/ligação (BB-L):
 - Espessura 7cm;
 - Módulo de deformabilidade 4400MPa;
 - Coeficiente de Poison 0,40.

- Sub-base (macadame hidráulico existente-MB-B):
 - Espessura 9cm;
 - Módulo de deformabilidade 110MPa;
 - Coeficiente de Poison 0,35.

- Solo de fundação (SF):
 - Espessura ∞ ;
 - Módulo de deformabilidade 100MPa;
 - Coeficiente de Poison 0,45.

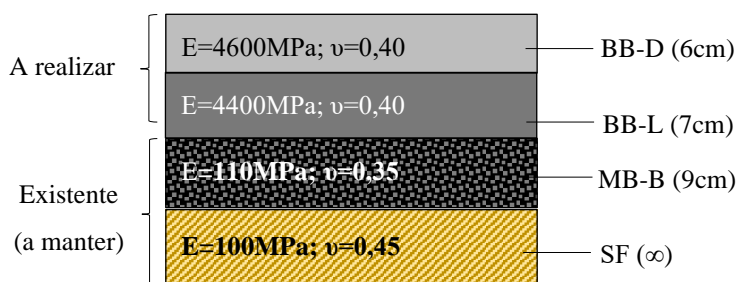


Figura 6.1 – Esquema estrutural do pavimento projetado

No que respeita à temperatura de cálculo utilizada na verificação estrutural do pavimento, é considerada uma temperatura, nas misturas betuminosas, integrada no grupo T2-24/23 (zonas temperadas) correspondente ao Distrito de Bragança em que se insere a estrada em estudo (E.N 221), conforme catalogado no anexo A.13 e A.14 do *Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários (JAE/DREN Porto, Março de 95)*.

De acordo com o prescrito no Anexo A.14, do mesmo manual, para o grupo de Temperatura T2 e os módulos de deformabilidade (E) de 4600MPa e 4400MPa, previstos em projeto, para as camadas de desgaste e regularização/ligação, respetivamente, são previsíveis as seguintes características nas misturas betuminosas.

- Camada de desgaste (BB-D):
 - $P_{200} = 6,6\%$;
 - Baridade = $2,34\text{g/cm}^3$;
 - Percentagem de betume = $5,4\%$;
 - Porosidade = $4,4\%$.

- Camada de regularização/ligação (BB-L):
 - $P_{200} = 6,0\%$;
 - Baridade = $2,32\text{g/cm}^3$;
 - Percentagem de betume = $5,2\%$;
 - Porosidade = $5,1\%$.

O betume considerado é da classe 60/70, sendo admitido uma penetração de 65 e um peso volúmico de $1,03\text{g/cm}^3$.

A frequência considerada no cálculo estrutural é de 10Hz, correspondendo a uma velocidade média de circulação dos veículos pesados de 60Km/h.

Partindo das características previsíveis das misturas betuminosas, estabelecidas em sede de projeto, através das relações básicas determinaram-se as restantes características para a formulação da camada de desgaste e regularização.

Os valores da massa volúmica “máxima” (ρ_{max}), massa volúmica do agregado (ρ_a), percentagem volumétrica de agregado (v_a) e percentagem volumétrica de betume (v_b) foram calculados através das expressões 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 respetivamente:

$$\rho_{max} = \frac{-100 \times \rho_t}{n - 100} \quad (6.1)$$

$$\rho_a = \frac{-p_a \times \rho_{max} \times \rho_b}{p_b \times \rho_{max} - 100 \times \rho_b} \quad (6.2)$$

$$v_a = \frac{p_a \times \rho_t}{\rho_a} \quad (6.3)$$

$$v_b = \frac{p_b \times \rho_t}{\rho_b} \quad (6.4)$$

Sendo ρ_t a massa volúmica da mistura betuminosa, ρ_b a massa volúmica do betume, p_a percentagem de agregado na mistura, p_b percentagem em betume da mistura e n a porosidade da mistura.

No quadro 6.1 apresentam-se as características base, previsíveis em sede de projeto, das misturas betuminosas que compõem a camada de desgaste e a camada de regularização

Quadro 6.1 – Características base das misturas betuminosas consideradas em sede de projeto

	Camada de desgaste (BB-D)	Camada de regularização/ligação (BB-L)
P ₂₀₀ (passado) [%]	6,6	6,0
p_b [%]	5,4	5,2
v_a [%]	83,32	83,18
v_b [%]	12,28	11,72

n [%]	4,4	5,1
ρ_t [g/cm ³]	2,34	2,32
ρ_b [g/cm ³]	1,03	1,03
ρ_a [g/cm ³]	2,657	2,644
ρ_{max} [g/cm ³]	2,448	2,445
E [MPa]	4600	4400

No quadro 6.2 apresentam-se as restantes premissas adotadas em sede de projeto, tais como a temperatura de serviço nas camadas betuminosas, classe do betume e TMDP entre outras.

Quadro 6.2 – Variáveis de projeto consideradas na conceção

Classe de betume	60/70
Pen 25 (índice penetração do betume) 10 ⁻¹ mm	65 [10 ⁻¹ mm]
T °C nas camadas betuminosas	24°C - Grupo T2 ⁽¹⁾
TMDP	230
Taxa de crescimento	3%
Nº acumulado de eixos padrão (vida útil de 10anos)	3,40E+5
Eixo padrão	130 [kN]
⁽¹⁾ – Anexo A.14 do <i>Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários (JAE/DREN Porto, Março de 95)</i> .	

A estrutura do pavimento, preconizada em sede de projeto, apresenta uma extensão vertical de compressão ao nível do solo de fundação de 615E-6, contra o valor admissível de 745E-6 (correspondente à passagem de 3,4E+5 eixos padrão de 130kN durante a vida útil do reforço – 10anos). Assim, recorrendo à lei de fadiga preconizada pela “Shell”, expressão 6.5 descrita anteriormente no ponto 4.3.5.2, para a extensão vertical de 615E-6 à superfície do solo de fundação, resulta um número acumulado de passagens equivalentes de eixos padrão admissíveis pela estrutura projetada de 7,33E+5.

$$\varepsilon_p = k_s \times N^{-0.25} \tag{6.5}$$

O número acumulado de eixos padrão de $7,33E+5$, admissíveis pela estrutura projetada, será comparado com o número de eixos padrão correspondente à estrutura do pavimento resultante da amostra em análise recolhida em fase de obra.

6.3 Parametrização das amostras recolhidas em obra e comparação de resultados

6.3.1 Metodologia de trabalho

Durante o processo construtivo do reforço, ao longo da sua extensão, foram realizadas campanhas de controlo das misturas betuminosas aplicadas nas respetivas camadas de regularização e desgaste. Cada campanha é referenciada ao Km em que ocorre e à camada a que pertence. Das campanhas de controlo obtém-se os seguintes parâmetros:

- Percentagem de betume (p_b);
- Percentagem de material que passa no peneiro #200 (*filler*);
- Gau de compactação ($G.C$) / porosidade;
- Espessura da camada betuminosa.

Estes parâmetros são variáveis suscetíveis de variação durante o processo construtivo, que, por sua vez, influenciam as propriedades mecânicas das misturas betuminosas, alterando o comportamento estrutural do pavimento.

Sendo o grau de compactação um dos principais parâmetros de qualidade a exigir a uma mistura betuminosa, refletindo o seu efeito na porosidade das misturas, doravante, de acordo com o designado no caderno de encargos e os boletins de controlo de qualidade realizados em obra às misturas betuminosas, o grau de compactação será indicador quanto à porosidade sentida nas misturas.

Pegando nos valores dos parâmetros obtidos em cada campanha de controlo, com recurso às relações básicas de formulação das misturas anteriormente enunciadas nas expressões 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, obtém-se os restantes parâmetros necessários para a completa caracterização paramétrica da mistura betuminosa, em análise, e determinação do respetivo módulo de deformabilidade (E).

O módulo de deformabilidade (E), de cada mistura analisada, é calculado pela expressão 6.6, preconizada pelo The Asphalt Institute e também adotada pelo *Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários (JAE/DREN Porto, Março de 95)*.

$$\log|E^*| = 5,553833 + 0,028829 \times \frac{P_{200}}{f^{0,167033}} - 0,03476 \times n + 0,070377 \times v + 0,000005 \times t^{[1,3+0,49825 \times \log(f)]} \times P_{bet}^{0,5} - 0,00189 \times t^{[1,3+0,49825 \times \log(f)]} \times \frac{P_{bet}^{0,5}}{f^{1,1}} + \frac{0,931757}{f^{0,02774}} \quad (6.6)$$

Sendo:

$|E^*|$ – resistência valor absoluto do módulo de deformabilidade [Psi];

P_{200} – percentagem de passados no peneiro ASTM nº200 [%];

f – frequência da aplicação da carga [Hz];

n – porosidade da mistura betuminosa, em obra [%];

v – viscosidade absoluta a 70 °F [Mpoises];

t – temperatura de cálculo [°F];

P_{bet} – percentagem ponderal de betume [%].

Em que:

$$v = 29508,2 \times P(25)^{-2,1939}$$

$P(25)$ – penetração considerada a 77°F, correspondente a 25°C;

Para o cálculo estrutural, das diferentes estruturas de pavimento, resultantes das campanhas de controlo das misturas betuminosas, recorreu-se ao programa (JPav1.1), desenvolvido pelo Professor Doutor Jorge C. Pais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, sendo apresentado no anexo II as notas de cálculo geradas pelo programa, de onde se retiram as respetivas extensões para as diferentes amostras estudadas.

Para o critério de fendilhamento, por fadiga, na base das camadas betuminosas e para o critério de deformação permanente no topo do solo de fundação, com uma probabilidade de sobrevivência de 95%, recorreu-se, respetivamente às expressões 6.7 e 6.8 recomendadas pela SHELL.

Fadiga por tração:

$$\varepsilon_t = (0,856 \times v_b + 1,08) \cdot E_m^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (6.7)$$

Sendo:

ε_t – extensão de tração (adimensional);

N – resistência à fadiga (nº de eixos-padrão);

v_b – percentagem volumétrica de betume no volume total;

E_m – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa [Pa].

Para ter em conta o tempo de recuperação da deformação (carregamento não continuado) em misturas densas com grande teor de betume, deve multiplicar-se a vida útil por 10 e em misturas abertas e pobres em betume devendo multiplicar-se a vida útil por 1,25.

Deformação Permanente:

$$\varepsilon_{dp} = K_S \times N^{-0,25} \quad (6.8)$$

Sendo:

ε_{dp} – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional);

N – resistência à deformação permanente (nº de eixos-padrão);

K_S – parâmetro que depende a probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento, em que toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,10 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%.

Na posse dos valores das extensões de tração (ε_t) e das extensões de compressão/deformação permanente (ε_{dp}), para cada estrutura em análise, são determinados os valores do número de eixos-padrão que a respetiva estrutura admite para cada critério, sendo que o menor valor é o determinante para a vida útil da estrutura em questão. O número de eixos-padrão admissível pela estrutura analisada é comparado com o número de eixos-padrão admissível pela estrutura prevista em sede de projeto, averiguando assim se a estrutura em análise é suficientemente

estável ou se entra em ruína antes do previsto em sede projeto (vida útil 10 anos). A variação percentual entre o número de eixos padrão da estrutura projetada e o número de eixos padrão da estrutura analisada é determinada pela expressão 6.9.

$$\Delta N = \frac{N_{130-i} - N_{130}}{N_{130}} \quad (6.9)$$

Sendo:

N_{130-i} – número de eixos padrão que a estrutura em análise admite, resultante da variação ocorrida em obra do fator i em estudo;

N_{130} – número de eixos padrão admissíveis pela estrutura projetada.

6.3.2 Parametrização das amostras recolhidas em fase de obra (*in situ*)

Durante o processo construtivo de um pavimento existem diversos fatores que influenciam a sua durabilidade, no entanto, para efeitos do presente estudo vão considerar-se quatro fatores preponderantes, sendo eles a percentagem de betume, percentagem de filler, grau de compactação e espessura das camadas betuminosas, como já referido.

De modo a perceber-se o efeito da variação de cada fator na estrutura, os valores de referência de cada variável em estudo (% bet., % filler, G.C e h_{camada}) são substituídos de uma forma faseada, ordenada e cumulativa pelos respetivos valores observados na amostra em causa, resultando tantas simulações como fatores em análise, sendo que na última simulação resulta a parametrização completa da amostra em questão e o respetivo número de eixos padrão por ela admitidos. No anexo I encontram-se patentes os valores referentes à variação das variáveis, percentagem de betume, percentagem de filler, grau de compactação e espessura da camada das respetivas amostras objeto de estudo.

A introdução da variação de cada variável é feita da seguinte forma:

- Primeira simulação: o valor de referência da variável % de betume é substituído pelo valor da % de betume observado na amostra, mantendo inalteráveis os valores de referência das restantes variáveis (% filler, G.C e altura da camada betuminosa);
- Segunda simulação: os valores de referência das variáveis % de betume e % de filler são substituídos pelos respetivos valores observados na amostra, mantendo inalteráveis os valores de referência das restantes variáveis (G.C e altura da camada betuminosa);

- Terceira simulação: os valores de referência das variáveis % de betume, % de filler e G.C são substituídos pelos respectivos valores observados na amostra, mantendo inalterável o valor de referência da altura da camada betuminosa;
- Quarta simulação e última: todos valores de referência das variáveis (% bet., % filler, G.C e $h_{camada\ bet.}$) são substituídos pelos respectivos valores observados na amostra.

De notar que em cada simulação só é alterada uma única variável relativamente à simulação imediatamente anterior, percebendo assim a influência dessa variável, quer positiva ou negativa, no desempenho da estrutura da amostra em estudo.

Neste caso em concreto, o critério acima descrito, referente à introdução das variáveis, depreende-se com a possibilidade de poder fazer corresponder o somatório da variação do número de eixos-padrão ($\sum\Delta N$), entre simulações, igual à diferença (a mais ou a menos) entre o número de eixos padrão admissível pela amostra e o número de eixos-padrão de projeto. Desta forma consegue-se atribuir o peso relativo referente à variação de cada variável, no valor final, entre o número de eixos-padrão admissível pela amostra e o previsto, sendo a interpretação dos resultados facilitada a compreensão mais intuitiva sobre o efeito da variação das variáveis dentro das respetivas amostras. De outra forma, fazendo simulações para cada variável, sem contar com o contributo da simulação imediatamente anterior, obtemos valores isolados para cada simulação, não sendo possível determinar o peso relativo da variação do número de eixos-padrão provocado pelas variáveis presentes na amostra em estudo. Neste caso, o somatório da variação do número de eixos-padrão entre cada simulação é diferente da diferença entre o número de eixos padrão admissível pela amostra e o número de eixos-padrão de projeto. Por outro lado, refira-se, neste caso em concreto, como se pode constatar pelos gráficos apresentados no anexo III, para a simulação independentes das variáveis, constata-se que a sua influência sobre a mesma variação anda na mesma ordem de grandeza que as verificadas para as simulações descritas no método adotado, evidenciando-se o mesmo espetro gráfico quanto à representação da influência da variação das variáveis. Quer uma abordagem quer a outra convergirão no mesmo tipo de conclusões.

Apresentada a metodologia adotada e os modelos a aplicar, passamos expor a parametrização das respetivas amostras de modo a alcançar o objetivo de estudo:

1) Amostra ao Km 56+600 (faixa da direita) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.1 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 56+600 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (-0,2%) *	Δ % filler (+0,3%) *	Δ % G.C (-0,6%) *	Δ hcamada (+7,5cm) *	
% bet.	5,2	5,0	5,0	5,0	5,0	
% filler	6,0	6,0	6,3	6,3	6,3	
G.C [%]	100	100	100	99,40	99,40	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	14,5	
E [MPa]	4400	4441	4501	4300	4300	
ϵ_t	2,880E-04	2,872E-04	2,852E-04	2,922E-04	1,736E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,141E-04	6,119E-04	6,194E-04	3,557E-04	
Nt130	3,710E+06	3,121E+06	3,155E+06	2,950E+06	3,986E+07	
Ndp130	7,330E+05	7,381E+05	7,488E+05	7,132E+05	6,558E+06	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
ΔN	-	+ 5,100E+03	+ 1,582E+04	- 1,980E+04	+ 5,825E+6	
ΔN [%]	-	+ 0,70	+ 2,16	- 2,70	+ 794,64	Total
ΔN entre simulações	-	+ 5,100E+03	+1,067E+04	-3,561E+04	+5,845E+06	+ 5,825E+6
ΔN [%] entre simulações	-	+ 0,70	+ 1,46	- 4,86	+ 797,35	+ 794,64
ΔN [%] relativa	-	+ 0,09	+ 0,18	- 0,61	100,34	100

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

Com base nos resultados apresentados na tabela 6.1 pode dizer-se que a estrutura resultante da amostra em estudo, ao Km 56+600, admite um número acumulado de eixos-padrão de 6,558E+6, logo superior ao número de eixos-padrão admissíveis pela estrutura de projeto (7,330E+5). A variação do número de eixos-padrão entre a estrutura em estudo e a estrutura projetada é da ordem de 5,825E+6.

O principal fator responsável por tamanha variação é o aumento bruto da espessura da camada de regularização, que passa de 7cm para 14,5cm, provocando assim um aumento do número eixos-padrão na ordem dos 794,64%, relativamente ao número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada, como se pode observar pelo declive acentuado da reta no gráfico apresentado na figura 6.2. O aumento “exagerado” da espessura da camada, neste caso, não se pode considerar ou entender como um “erro” de execução, mas sim como uma consequência

da técnica utilizada nas obras de beneficiação, que passa por uma pré regularização nas zonas de maior depressão, resultando nestes casos numa maior espessura da camada de regularização.

Embora a estrutura, globalmente, se tenha revelado suficiente para satisfazer as condições previstas, é de salientar que a variação negativa do grau de compactação, na ordem dos -0,6%, exerce um efeito desfavorável no desempenho da estrutura, fazendo diminuir o módulo de deformabilidade e, conseqüentemente, diminuição do número de eixos-padrão na ordem de -2,7%, quando comparado com o número de eixos-padrão admissível em projeto, e com um peso relativo de -0,61% dentro da variação total do número de eixos-padrão entre a estrutura em estudo e a estrutura projetada.

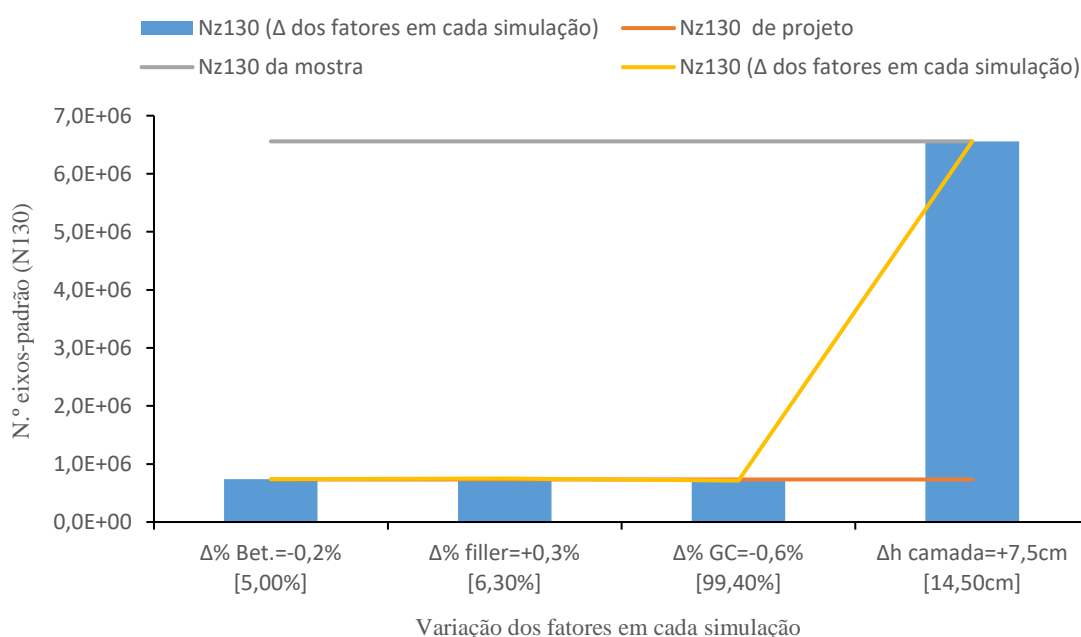


Figura 6.2 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 56+600 (faixa da direita)

2) Amostra ao Km 66+200 (faixa da direita) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.2 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 66+200 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,09%) *	Δ % filler (+0,4%) *	Δ % G.C (-1,29%) *	Δ hcamada (+2cm) *	
% bet.	5,2	5,29	5,29	5,29	5,29	
% filler	6,0	6,00	6,40	6,40	6,40	
G.C [%]	100	100	100	98,71	98,71	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	9,0	
E [MPa]	4400	4359	4438	4022	4022	
ϵ_t	2,880E-04	2,901E-04	2,873E-04	3,026E-04	2,595E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,172E-04	6,142E-04	6,306E-04	5,366E-04	
Nt130	3,710E+06	3,968E+06	4,033E+06	3,494E+06	7,534E+06	
Ndp130	7,330E+05	7,234E+05	7,377E+05	6,639E+05	1,266E+06	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
ΔN	-	-9,587E+03	+4,651E+03	-6,914E+04	+5,332E+05	
ΔN [%]	-	- 1,31	+ 0,63	- 9,43	72,74	Total
ΔN entre simulações	-	-9,587E+03	+1,424E+04	-7,379E+04	+6,023E+05	+5,332E+05
ΔN [%] entre simulações	-	-1,31	+1,94	-10,07	+82,17	+72,74
ΔN [%] relativa	-	-1,80	+2,67	-13,84	+112,97	100,00

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

Dos resultados apresentados na tabela 6.2 observa-se que a estrutura resultante da amostra em estudo, ao Km 66+200, admite um número acumulado de eixos-padrão na ordem dos 1,266E+6, ou seja, um acréscimo da ordem dos 72,74% relativamente ao número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada.

Como se pode observar pela inclinação ascendente da reta, na figura 6.3, que representa a variação do número de eixos-padrão, o principal fator pelo aumento do número de eixos-padrão é o aumento da espessura da camada de regularização, que sofreu um aumento de 2cm, passando de 7cm (estabelecido em projeto) para 9cm durante a execução, assumindo aqui a variação da espessura um peso relativo de 112,97% no que diz respeito à variação total do número de eixos-padrão entre o projetado e o realizado *in situ*.

No entanto, é de salientar que a variação de +0,09% na percentagem de betume e a variação de -1,29% no grau de compactação, exercem um efeito negativo no desempenho estrutural da camada em estudo, constatado pela inclinação descendente da reta (figura 6.3), tendo consequências negativas no módulo de deformabilidade, provocando uma variação na ordem dos -1,8% e -9,43%, respetivamente, dentro da variação total do número de eixos-padrão entre a estrutura projetada e a estrutura em análise.

Embora a variação da percentagem de betume e do grau de compactação tenham exercido um efeito negativo, globalmente, a estrutura é claramente resistente, tudo graças à variação positiva da espessura da camada de regularização que acaba por compensar as perdas provocadas pelo efeito negativo das variações da percentagem de betume e do grau de compactação.

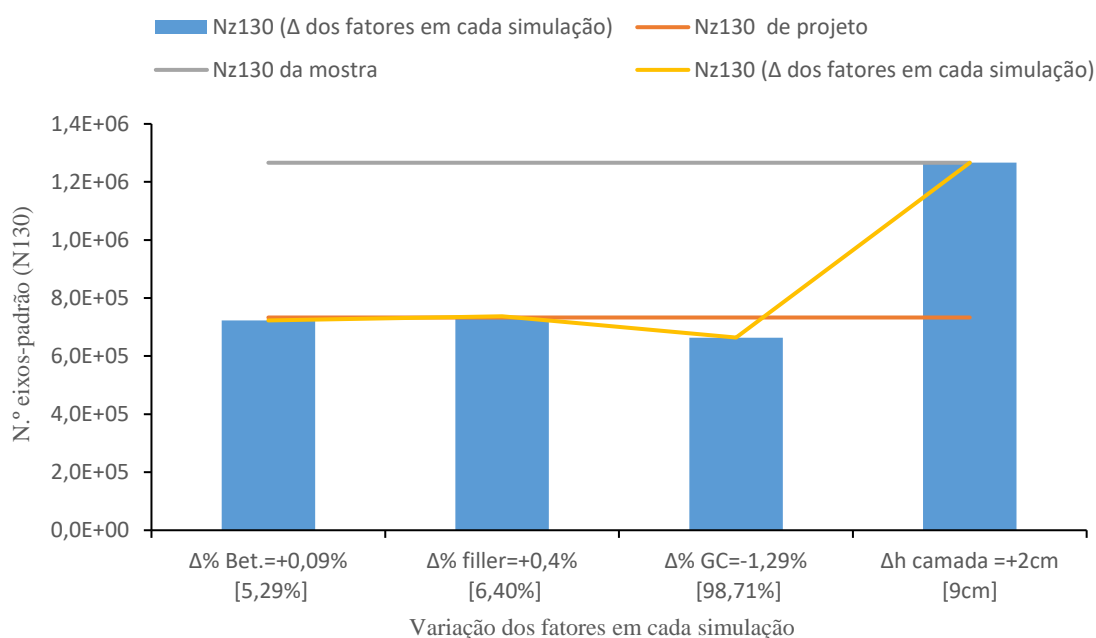


Figura 6.3 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 62+200 (faixa da direita)

3) Amostra ao Km 69+000 (faixa da direita) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.3 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 69+000 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (-0,2%) *	Δ % filler (+0,1%) *	Δ % G.C (-1,9%) *	Δ hcamada (+0cm) *	
% bet.	5,2	5,00	5,00	5,00	5,00	
% filler	6,0	6,00	6,10	6,10	6,10	
G.C [%]	100	100	100	98,1	98,10	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	
E [MPa]	4400	4441	4460	3865	3865	
ϵ_t	2,880E-04	2,872E-04	2,866E-04	3,089E-04	3,089E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,141E-04	6,134E-04	6,373E-04	6,373E-04	
Nt130	3,710E+06	3,121E+06	3,130E+06	2,559E+06	2,559E+06	
Ndp130	7,330E+05	7,381E+05	7,415E+05	6,364E+05	6,364E+05	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
ΔN	0	+5,131E+03	+8,506E+03	-9,662E+04	-9,662E+04	
ΔN [%]	0	+ 0,70	+ 1,16	- 13,18	- 13,18	Total
ΔN entre simulações	0	+5,131E+03	+3,375E+03	-1,051E+05	0,000E+00	-9,662E+04
ΔN [%] entre simulações	0	+0,70	+0,46	-14,34	0,00	-13,18
ΔN [%] relativa	0	-5,31	-3,49	+108,80	0,00	100,00

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura resultante da amostra Km 69+000 revela-se insuficiente, uma vez que admite apenas um número de eixo-padrão na ordem dos $6,364E+5$, logo inferior aos $7,330E+5$ previstos para a estrutura projetada, conforme resultados apresentados na tabela 6.3.

Como se pode constatar pelo declive descendente da reta representativa da variação do número de eixos-padrão, na figura 6.4, o principal fator responsável pelo desempenho negativo da estrutura é o grau de compactação que sofre uma variação de -1,29%, resultando num grau de compactação de 98,1%. Tal variação exerce um efeito negativo sobre o módulo de deformabilidade da camada de regularização que diminui substancialmente. Os fatores, percentagem de betume e percentagem de filler não observam variações significativas, sendo negligenciável o seu efeito no que respeita à variação do número de eixos-padrão, como se pode observar pela proximidade entre a reta representativa da variação do número de eixos-padrão e

a reta que define o número de eixos-padrão de projeto na figura 6.4. Salienta-se, neste caso, que a espessura da camada é o único fator que não sofreu variação relativamente ao previsto.

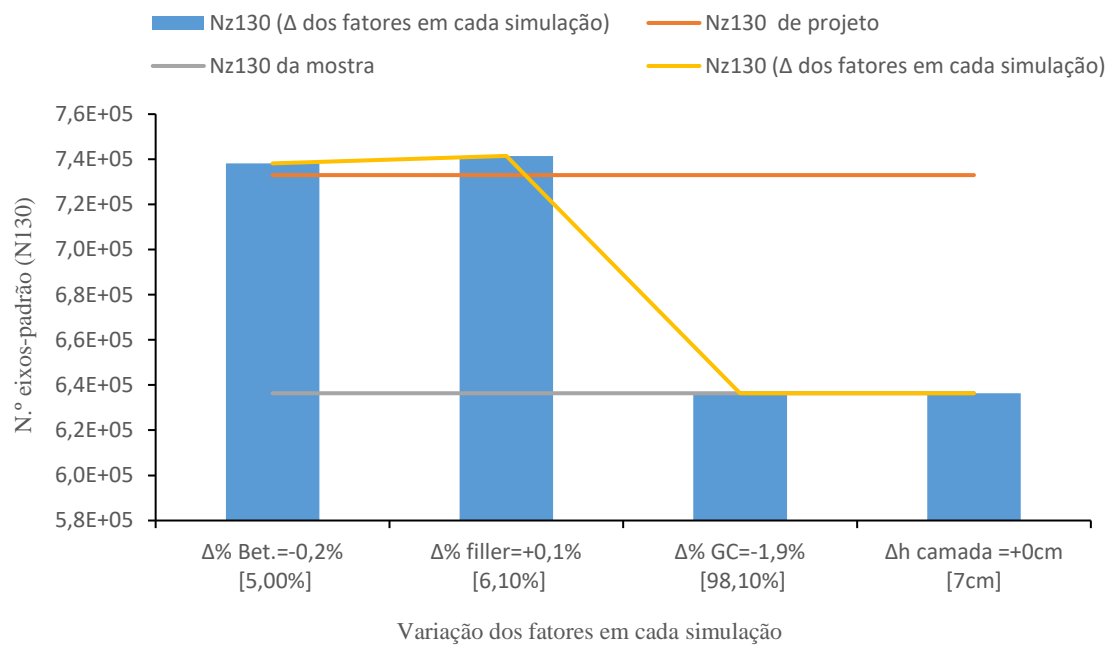


Figura 6.4 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 69+000 (faixa da direita)

4) Amostra ao Km 70+500 (faixa da direita) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.4 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 70+500 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,27%) *	Δ % filler (-0,12%) *	Δ % G.C (-4,35%) *	Δ hcamada (-2,1cm) *	
% bet.	5,2	5,47	5,47	5,47	5,47	
% filler	6,0	6,00	5,88	5,88	5,88	
G.C [%]	100	100	100	95,65	95,65	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	4,9	
E [MPa]	4400	4313	4290	3078	3078	
ϵ_t	2,880E-04	2,917E-04	2,925E-04	3,473E-04	4,101E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,189E-04	6,198E-04	6,723E-04	8,136E-04	
Nt130	3,710E+06	4,569E+06	4,551E+06	2,862E+06	1,247E+06	
Ndp130	7,330E+05	7,155E+05	7,114E+05	5,139E+05	2,396E+05	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
ΔN	0	-1,750E+04	-2,165E+04	-2,191E+05	-4,934E+05	
ΔN [%]	0	-2,38	-2,95	-29,90	-67,32	Total
ΔN entre simulações	0	-1,750E+04	-4,147E+03	-1,975E+05	-2,743E+05	-4,934E+05
ΔN [%] entre simulações	0	-2,39	-0,57	-26,94	-37,42	-67,32
ΔN [%] relativa	0	3,55	0,84	40,03	55,59	100,00

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura analisada na amostra ao Km 70+500, tabela 6.4, é claramente insuficiente, admitindo apenas um número de eixos-padrão na ordem dos $2,396E+5$, o que equivale a uma diminuição do número de eixos-padrão na ordem dos -67,32 % quando comparado com o número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada ($7,330E+5$).

Neste caso, em concreto, todos os fatores em estudo sofreram variações no sentido desfavorável ao desempenho da estrutura, a observar pela, sempre, variação negativa do número de eixos-padrão, sentida em cada simulação, constante na tabela 6.4.

No entanto, destacam-se a variação do grau de compactação e variação da espessura da camada de regularização como os principais responsáveis pelo desempenho negativo da estrutura, como se pode observar pela acentuada inclinação descendente da reta, representativa da variação do número de eixos-padrão, na figura 6.5, para os fatores G.C e espessura da camada.

O grau de compactação sofre uma variação de -4,35%, resultando assim um grau de compactação de apenas 95,65%, afetando gravemente o módulo de deformabilidade da camada de regularização, baixando o módulo de deformabilidade para valores da ordem dos 3078MPa contra os 4400MPa previstos em sede de projeto.

A espessura da camada de regularização sofre uma diminuição de 2,1cm, passando de 7cm para 4,9cm *in situ*, provocando uma diminuição relativa do número de eixos-padrão na ordem dos -2,743E+5.

Face à variação total do número de eixos-padrão, entre a estrutura projetada e a estrutura em análise (-4,934E+5), o grau de compactação assume um peso negativo na variação do número de eixos-padrão na ordem dos 40,03% e, por sua vez, a variação da espessura da camada de regularização assume um peso negativo na ordem dos 55,59%. Assim, a variação do grau de compactação e a variação da espessura da camada, acabam por ser os grandes responsáveis pelo mau desempenho da estrutura *in situ*.

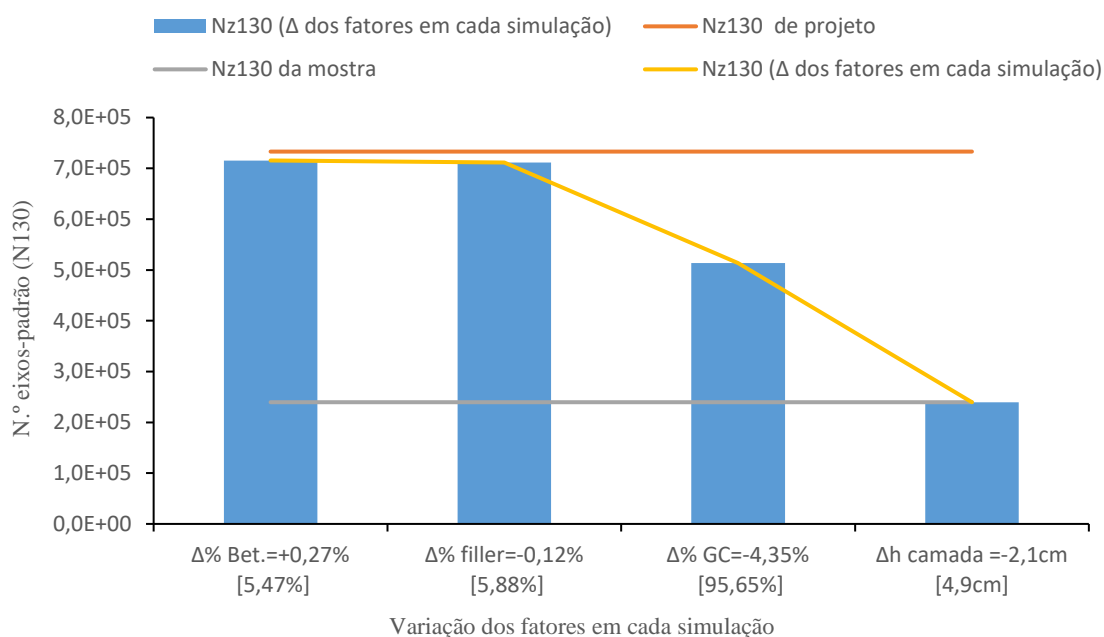


Figura 6.5 – Variação do N₁₃₀ em função da variação dos fatores na amostra Km 70+500 (faixa da direita)

5) Amostra ao Km 70+800 (faixa da direita) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.5 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 70+800 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,27%) *	Δ % filler (+0,3%) *	Δ % G.C (-4,55%) *	Δ hcamada (-2,1cm) *	
% bet.	5,2	5,47	5,47	5,47	5,47	
% filler	6,0	6,00	6,30	6,30	6,30	
G.C [%]	100	100	100	95,45	95,45	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	4,9	
E [MPa]	4400	4313	4372	3094	3094	
et	2,880E-04	2,917E-04	2,896E-04	3,464E-04	4,091E-04	
εdp	6,150E-04	6,189E-04	6,167E-04	6,764E-04	8,126E-04	
Nt130	3,710E+06	4,569E+06	4,623E+06	2,850E+06	1,241E+06	
Ndp130	7,330E+05	7,155E+05	7,258E+05	5,015E+05	2,408E+05	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
Δ N	0	-1,750E+04	-7,238E+03	-2,315E+05	-4,922E+05	
Δ N [%]	0	- 2,39	- 0,99	- 31,58	- 67,15	Total
Δ N entre simulações	0	-1,750E+04	1,026E+04	-2,243E+05	-2,607E+05	-4,922E+05
Δ N [%] entre simulações	0	-2,39	1,40	-30,59	-35,57	-67,15
Δ N [%] relativa	0	3,56	-2,09	45,56	52,97	100,00

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura resultante da amostra ao Km 70+800, conforme valores apresentados na tabela 6.5, admite, apenas, um número de eixos-padrão na ordem dos 2,408E+05, o que equivale a uma diminuição de -67,15% comparativamente com o número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada (7,330E+05).

Na amostra em estudo, todos os fatores, exceto a percentagem de filler, sofreram variações no sentido desfavorável ao desempenho global da estrutura, destacando-se a variação do grau de compactação e a espessura da camada, como os principais responsáveis pela diminuição do número de eixos-padrão, como se pode constatar pela elevada inclinação descendente da reta representativa da variação do número de eixos-padrão, ilustrada na figura 6.6, para os fatores em causa.

O grau de compactação sofre uma variação de -4,55%, resultando um grau de compactação de apenas 95,45%, que por sua vez faz diminuir o módulo de deformabilidade da mistura para valores da ordem dos 3094MPa.

A espessura da camada de regularização sofre uma diminuição de -2,1cm, apresentando apenas uma espessura de 4,9cm contra os 7cm admitidos em sede de projeto, contribuindo assim para uma diminuição relativa -2,607E+05 eixos-padrão face à variação total do número de eixos-padrão.

A variação total do número de eixos-padrão entre a estrutura projetada e a estrutura em análise situa-se na ordem dos -4,922E+05, sendo que o grau de compactação assume um peso relativo na diminuição do número de eixos-padrão na ordem dos 45,56%. Por sua vez, a variação da espessura, devido à sua amplitude, acaba por atingir um peso relativo na diminuição do número de eixos-padrão na ordem dos 52,97%.

Face à grande amplitude observada na variação do grau de compactação e da espessura da camada, estes dois fatores definem-se como os principais responsáveis pelo desempenho negativo da estrutura em estudo, passando assim para segundo plano a contribuição negativa resultante da variação sentida na percentagem de betume e na percentagem de filler.

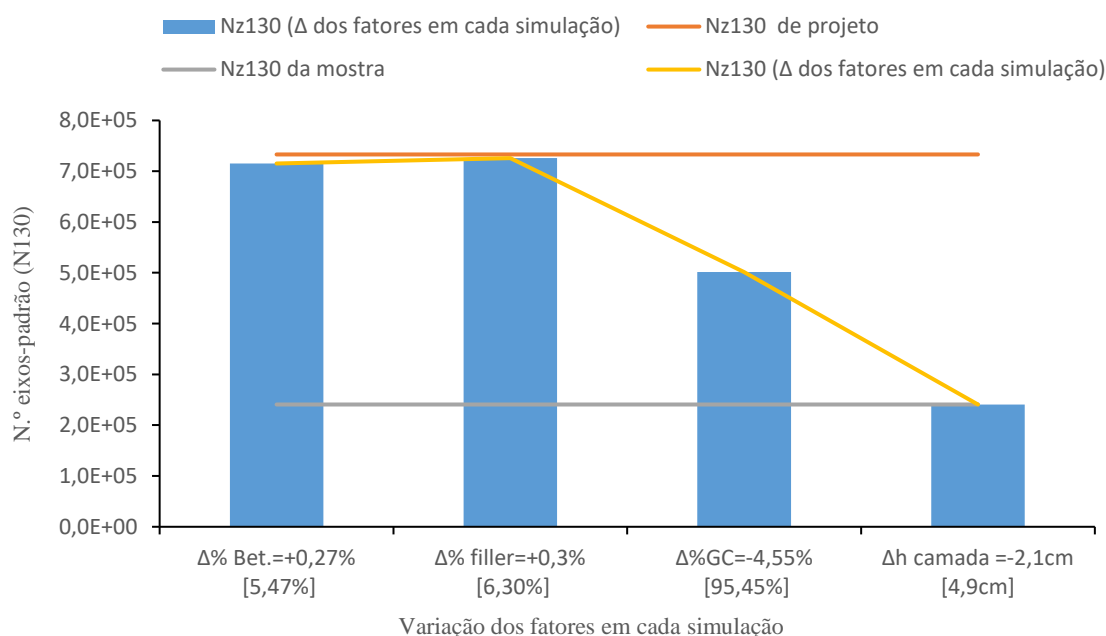


Figura 6.6 – Variação do N₁₃₀ em função da variação dos fatores na amostra Km 70+800 (faixa da direita)

6) Amostra ao Km 72+500 (faixa da direita) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.6 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 72+500 na faixa da direita referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,69%) *	Δ % filler (-1,40%) *	Δ % G.C (-1,94%) *	Δ hcamada (-0,7cm) *	
% bet.	5,2	5,89	5,89	5,89	5,89	
% filler	6,0	6,00	4,60	4,60	4,60	
G.C [%]	100	100	100	98,06	98,06	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	6,3	
E [MPa]	4400	4214	3958	3408	3408	
ϵ_t	2,880E-04	2,953E-04	3,051E-04	3,297E-04	3,486E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,228E-04	6,333E-04	6,592E-04	6,979E-04	
Nt130	3,710E+06	6,283E+06	5,974E+06	4,849E+06	3,670E+06	
Ndp130	7,330E+05	6,977E+05	6,526E+05	5,559E+05	4,425E+05	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
ΔN	0	-3,530E+4	- 8,040E+4	- 1,771E+5	-2,905E+5	
ΔN [%]	0	- 4,81	- 10,97	- 24,16	-39,63	Total
ΔN entre simulações	0	-3,526E+04	-4,514E+04	-9,668E+04	-1,134E+05	-2,905E+05
ΔN [%] entre simulações	0	-4,81	-6,16	-13,19	-15,47	-39,63
ΔN [%] relativa	0	12,14	15,54	33,28	39,05	100,00

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura analisada na amostra ao Km 72+500, resultados patentes na tabela 6.6, admite um número de eixos-padrão na ordem dos 4,425E+05, o que significa uma diminuição na ordem dos 39,63% comparativamente com o número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada (7,330E+05).

No caso, em concreto, todos os fatores variam no sentido desfavorável ao desempenho global da estrutura, como se pode observar pela evolução descendente da reta representativa da variação do número de eixos-padrão em função dos valores dos fatores na figura 6.7.

O grau de compactação e a espessura da camada são os fatores, cuja sua variação, proporcionaram um peso relativo na variação total do número de eixos-padrão maior,

comparativamente com o efeito negativo da contribuição da variação observada na percentagem de betume e na percentagem de *filler*.

O grau de compactação apresenta um peso relativo na diminuição do número de eixos-padrão na ordem dos 33,28%, por sua vez, a variação negativa da espessura assume um peso relativo de -39,05% face à variação total do número de eixos-padrão.

A variação da percentagem de betume e da percentagem de *filler*, neste caso, assumem um peso relativo inferior ao grau de compactação e à espessura da camada, como se pode constatar pela inclinação mais suave da reta representativa da variação do número de eixos-padrão (figura 6.7), para a variação dos fatores percentagem de betume e percentagem de *filler*. Contudo, apresentam algum significado na diminuição total do número de eixos-padrão, sendo que a variação da percentagem de betume assume um peso relativo na diminuição total do número de eixos-padrão na ordem de 12,14% seguido da variação da percentagem de *filler* que assume um peso relativo de 15,54% na diminuição total do número de eixos-padrão.

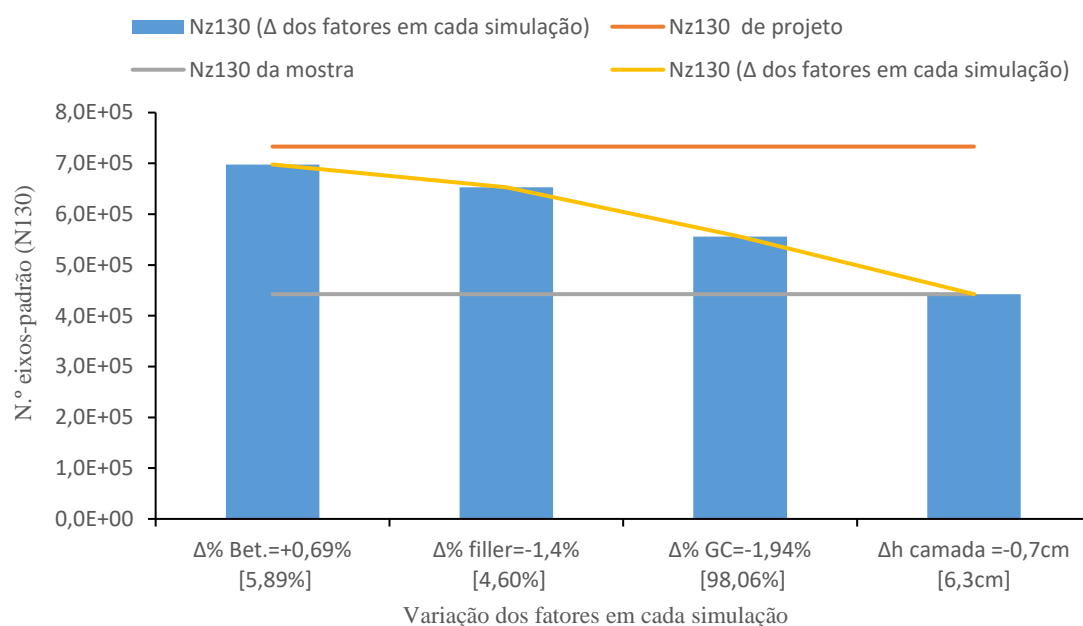


Figura 6.7 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 72+500 (faixa da direita)

7) Amostra ao Km 56+700 (faixa da esquerda) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.7 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 56+700 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,1%) *	Δ % Filler (-0,6%) *	Δ % G.C (-2,5%) *	Δ hcamada (+1,0cm) *	
% bet.	5,2	5,30	5,30	5,30	5,30	
% filler	6,0	6,00	5,40	5,40	5,40	
G.C [%]	100	100	100	97,5	97,50	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	8,0	
E [MPa]	4400	4358	4243	3507	3507	
et	2,880E-04	2,901E-04	2,942E-04	3,249E-04	3,005E-04	
edp	6,150E-04	6,172E-04	6,216E-04	6,542E-04	6,040E-04	
Nt130	3,710E+06	4,000E+06	3,913E+06	2,992E+06	4,421E+06	
Ndp130	7,330E+05	7,234E+05	7,031E+05	5,731E+05	7,888E+05	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
Δ N	0	-9,587E+03	-2,985E+04	-1,599E+05	5,576E+04	
Δ N [%]	0	- 1,31	- 4,07	- 21,81	+ 7,61	Total
Δ N entre simulações	0	-9,587E+03	-2,027E+04	-1,300E+05	2,156E+05	5,576E+04
Δ N [%] entre simulações	0	-1,31	-2,76	-17,74	29,42	7,61
Δ N [%] relativa	0	-17,19	-36,35	-233,20	386,75	100

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura analisada na amostra ao Km 56+700, conforme dados apresentados na tabela 6.7, globalmente, apresenta um número de eixos-padrão admissível na ordem dos 7,888E+05, o que representa um acréscimo na ordem dos 7,61% comparativamente com o número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada (7,330E+05).

Dentro dos quatro fatores analisados, como se pode constatar pela evolução da reta do número de eixos-padrão para cada fator, na figura 6.8, percebe-se que, à exceção da espessura da camada, todos os outros fatores evoluíram no sentido desfavorável (inclinação descendente da reta). Por sua vez a variação da espessura da camada influencia positivamente o número de eixos-padrão, como se pode observar pela inclinação ascendente da reta (figura 6.8).

Dos fatores que influenciaram negativamente o desempenho da estrutura, destaca-se o grau de compactação que assume um peso relativo de -233,20% na variação total do número de eixos-padrão, apresentando a reta do número de eixos-padrão maior declive descende para este fator (figura 6.8). Por sua vez, a variação positiva da espessura da camada de regularização, passando de 7cm para 8cm, influencia positivamente o desempenho da estrutura, contribuindo em 386,75% sobre o valor total da variação do número de eixos-padrão admissível pela estrutura em estudo.

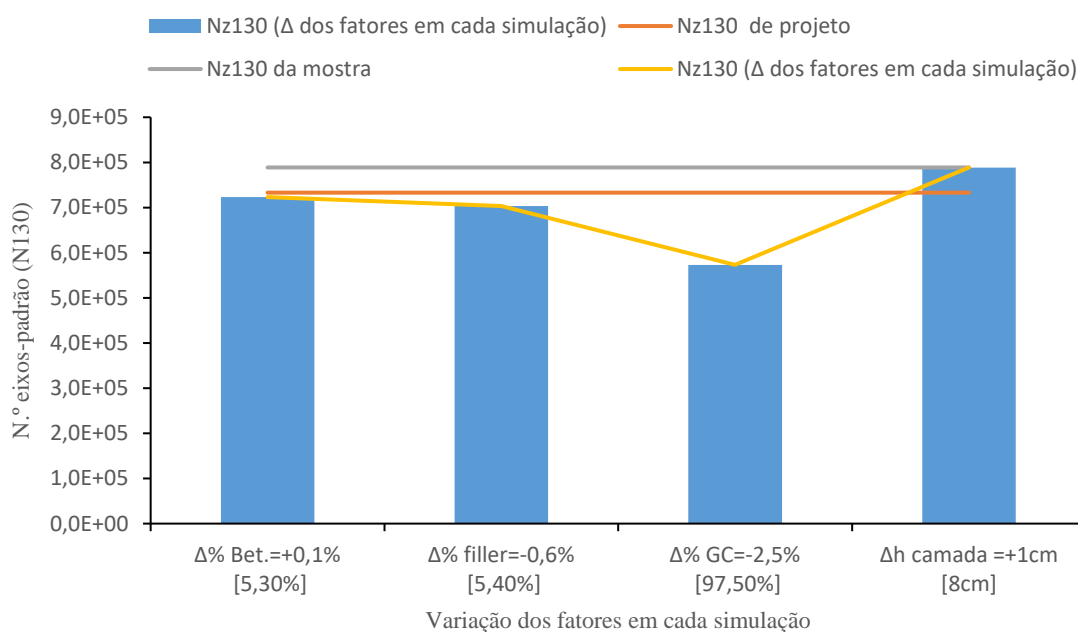


Figura 6.8 – Variação do N₁₃₀ em função da variação dos fatores na amostra Km 56+700 (faixa da esquerda)

8) Amostra ao Km 61+800 (faixa da esquerda) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.8 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 61+800 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,0%) *	Δ % Filler (-0,4%) *	Δ % G.C (-0,95%) *	Δ hcamada (-1,5cm) *	
% bet.	5,2	5,20	5,20	5,20	5,20	
% filler	6,0	6,00	5,60	5,60	5,60	
G.C [%]	100	100	100	99,05	99,05	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	5,5	
E [MPa]	4400	4400	4303	4005	4005	
ϵ_t	2,880E-04	2,880E-04	2,920E-04	3,012E-04	3,379E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,150E-04	6,193E-04	6,235E-04	7,187E-04	
Nt130	3,710E+06	3,710E+06	3,628E+06	3,388E+06	1,906E+06	
Ndp130	7,330E+05	7,330E+05	7,137E+05	6,946E+05	3,935E+05	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
ΔN	0	0	-1,935E+04	-3,838E+04	-3,395E+05	
ΔN [%]	0	0	- 2,64	- 5,24	- 46,32	Total
ΔN entre simulações	0	0	-1,935E+04	-1,904E+04	-3,012E+05	-3,395E+05
ΔN [%] entre simulações	0	0	-2,64	-2,60	-41,09	-46,32
ΔN [%] relativa	0	0	5,70	5,61	88,70	100,00

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura analisada na amostra ao Km 61+800, conforme dados apresentados na tabela 6.8, admite apenas um número de eixos-padrão na ordem dos 3,935E+05, o que significa uma diminuição na ordem dos -46,32% comparativamente com o número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada (7,330E+05).

Nos resultados apresentados, verifica-se que o principal potenciador de tamanha diminuição, do número de eixos-padrão, se depreende com a variação negativa da espessura da camada de regularização em -1,5cm, passando de 7cm para 5,5cm *in situ*. Neste caso, tal variação da espessura da camada acaba por assumir um peso relativo sobre a diminuição total do número de eixos-padrão na ordem dos 88,70%., conforme se pode observar pela elevada inclinação descendente da reta do número de eixos-padrão, figura 6.9, entre o fator G.C e espessura da camada.

Os fatores percentagem de filler e grau de compactação também variam no sentido desfavorável ao desempenho da estrutura, embora com menor expressão sobre a variação total do número de eixos-padrão, sendo que a variação na percentagem de filler (-0,4%) assume um peso relativo na ordem dos -5,70% sobre a variação total do número de eixos-padrão, seguido da variação do grau de compactação (-0,95%) que assume um peso relativo na ordem dos -5,61% sobre a variação total do número de eixos-padrão.

No caso em concreto, salienta-se que o fator percentagem de betume não observa qualquer variação.

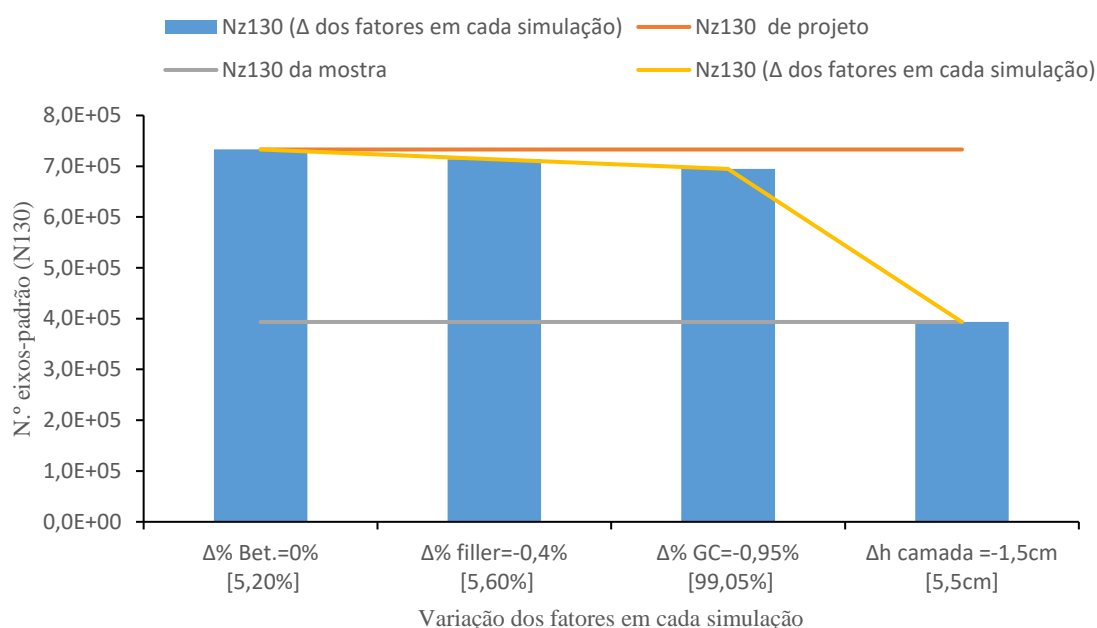


Figura 6.9 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 61+800 (faixa da esquerda)

9) Amostra ao Km 66+000 (faixa da esquerda) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.9 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 66+000 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,30%) *	Δ % Filler (-1,1%) *	Δ % G.C (-3,02%) *	Δ hcamada (+4,2cm) *	
% bet.	5,2	5,50	5,50	5,50	5,50	
% filler	6,0	6,00	4,90	4,90	4,90	
G.C [%]	100	100	100	96,98	96,98	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	11,2	
E [MPa]	4400	4305	4098	3254	3254	
et	2,880E-04	2,920E-04	2,996E-04	3,376E-04	2,509E-04	
εdp	6,150E-04	6,192E-04	6,274E-04	6,674E-04	4,892E-04	
Nt130	3,710E+06	4,680E+06	4,497E+06	3,256E+06	1,436E+07	
Ndp130	7,330E+05	7,141E+05	6,775E+05	5,291E+05	1,833E+06	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
Δ N	0	- 1889E+4	-5,550E+4	-2,039E+5	+ 1,100E+6	
Δ N [%]	0	- 2,58	- 7,57	-27,82	+ 150,06	Total
Δ N entre simulações	0	-1,889E+04	-3,661E+04	-1,484E+05	1,304E+06	1,100E+06
Δ N [%] entre simulações	0	0	-7,57	-20,24	177,87	150,06
Δ N [%] relativa	0	-1,72	-3,33	-13,49	118,54	100,00

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura analisada na amostra ao Km 66+000, resultados apresentados na tabela 6.9, revela um número de eixos padrão admissível na ordem dos 1,833E+06, representando um acréscimo na ordem dos 150,06% comparativamente com o número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada (7,330E+05).

O principal fator responsável por tamanha variação, do número de eixos-padrão, é o aumento significativo da espessura da camada de regularização, como se pode observar pela elevada inclinação ascendente da reta que define o número de eixos-padrão para o fator em causa (figura 6.10).

Neste caso, a variação da espessura da camada, dentro da variação total do número de eixos-padrão, assume um peso relativo na ordem dos 118,54%.

Os fatores, percentagem de betume, percentagem de filler e grau de compactação apresentam variações no sentido desfavorável ao desempenho da estrutura, como se pode constatar pela inclinação descendente da reta do número de eixos-padrão para estes fatores na figura 6.10. Dentro dos três fatores que influenciaram negativamente o desempenho da estrutura, destaca-se o grau de compactação com uma variação de -3,02%, equivalendo a um grau de compactação de apenas 96,68%, afetando por sua vez, com algum significado, o módulo de deformabilidade da camada. O peso relativo, neste caso, do grau de compactação sobre a variação total do número de eixos-padrão acaba por ser da ordem dos -13,49%. No entanto, a estrutura, como já foi referido, é amplamente estável, comparativamente com o número de eixos-padrão admissíveis em sede de projeto, tudo graças à grande variação positiva da espessura da camada de regularização.

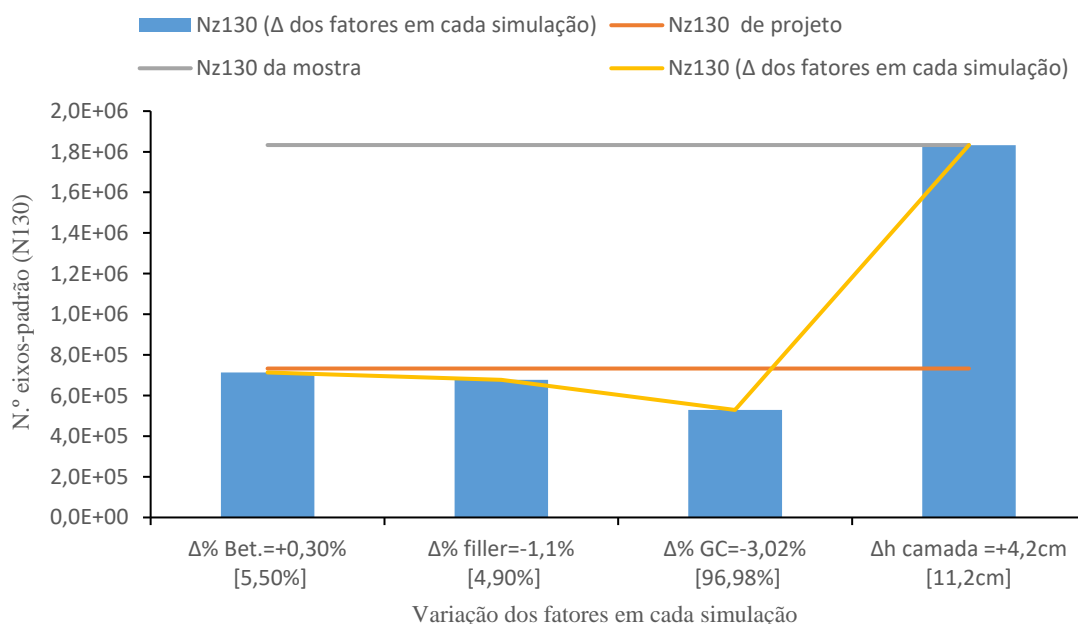


Figura 6.10 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 66+000 (faixa da esquerda)

10) Amostra ao Km 72+700 (faixa da esquerda) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.10 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 72+700 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,20%) *	Δ % Filler (-2,5%) *	Δ % G.C (-2,72%) *	Δ hcamada (+2,0cm) *	
% bet.	5,2	5,40	5,40	5,40	5,40	
% filler	6,0	6,00	3,50	3,50	3,50	
G.C [%]	100	100	100	97,28	97,28	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	9,0	
E [MPa]	4400	4326	3868	3146	3146	
ϵ_t	2,880E-04	2,912E-04	3,088E-04	3,435E-04	2,960E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,184E-04	6,372E-04	6,734E-04	5,780E-04	
Nt130	3,710E+06	4,320E+06	3,940E+06	2,963E+06	6,236E+06	
Ndp130	7,330E+05	7,178E+05	6,368E+05	5,105E+05	9,405E+05	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
ΔN	0	-1,519E+04	-9,622E+04	-2,225E+05	2,075E+05	
ΔN [%]	0	- 2,07	- 13,13	-30,35	+ 28,31	Total
ΔN entre simulações	0	-1,519E+04	-8,104E+04	-1,263E+05	4,300E+05	2,075E+05
ΔN [%] entre simulações	0	-2,07	-11,06	-17,23	58,67	28,31
ΔN [%] relativa	0	-7,32	-39,05	-60,84	207,21	100

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura analisada na amostra ao Km 72+700, dados expostos na tabela 6.10, apresenta um número de eixos-padrão admissível na ordem dos 9,405E+05, representando um acréscimo na ordem dos 28,31% comparativamente com o número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada (7,330E+05). Embora a estrutura apresente um número de eixos-padrão superior ao da estrutura projetada, é de referir que, na amostra em estudo, os fatores percentagem de betume, percentagem de *filler* e grau de compactação evoluíram no sentido desfavorável ao desempenho da estrutura, apresentando a reta que define o número de eixos-padrão, para os fatores em causa, uma inclinação descendente, conforme representado na figura 6.11.

Dos três fatores que evoluíram negativamente, dentro da estrutura, o grau de compactação é o que mais se destaca (maior inclinação da reta, figura 6.11), tudo devido à sua grande variação

(-2,72%), resultando um grau de compactação de 97,28%, contribuindo significativamente na diminuição do módulo de deformabilidade da camada de regularização.

O peso relativo, neste caso, do grau de compactação sobre a variação total do número de eixos-padrão é da ordem dos -60,84%, seguindo-se a variação da percentagem de filler com um peso relativo de -39,05% e a variação da percentagem de betume com um peso relativo de -7,32%.

Contudo, a estrutura apresenta um número de eixos-padrão superior à estrutura projetada, tudo graças ao aumento significativo da espessura da camada (+2cm), passando de 7cm para 9cm *in situ*, contribuindo assim para o aumento significativo do número de eixos-padrão. Neste caso, a variação da espessura da camada acaba por assumir um peso relativo na ordem dos 207,21% face à variação total do número de eixos-padrão.

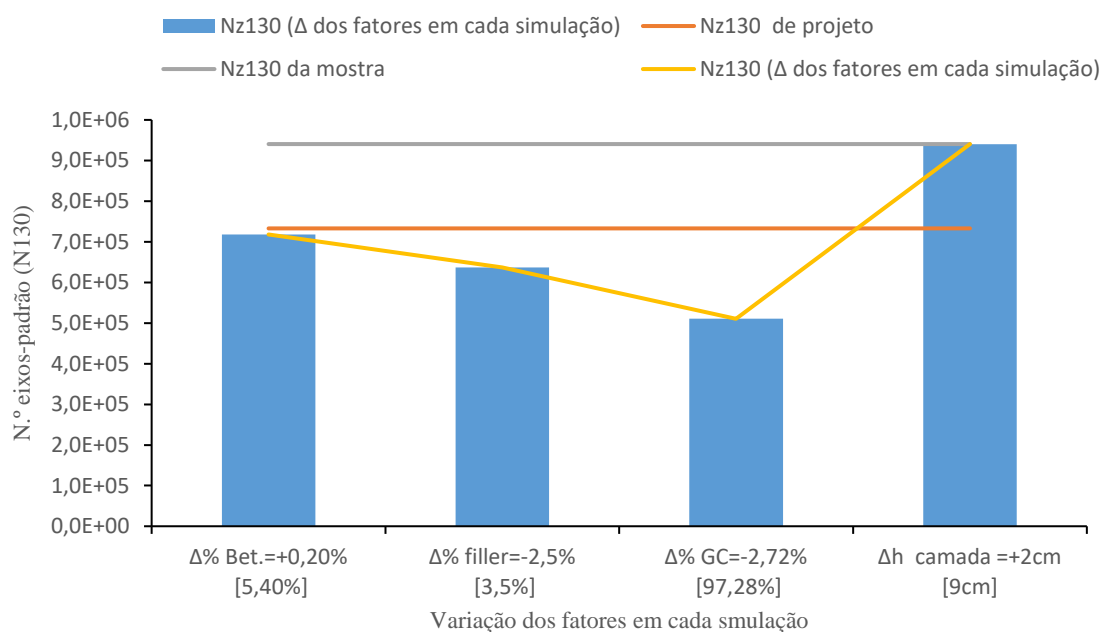


Figura 6.11 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 72+700 (faixa da esquerda)

11) Amostra ao Km 73+000 (faixa da esquerda) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.11 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 73+000 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (+0,33%) *	Δ % Filler (-0,30%) *	Δ % G.C (-3,23%) *	Δ hcamada (+2,0cm) *	
% bet.	5,2	5,53	5,53	5,53	5,53	
% filler	6,0	6,00	5,70	5,70	5,70	
G.C [%]	100	100	100	96,77	96,77	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	9,0	
E [MPa]	4400	4297	4240	3311	3311	
ϵ_t	2,880E-04	2,923E-04	2,943E-04	3,346E-04	2,880E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,195E-04	6,217E-04	6,643E-04	5,692E-04	
Nt130	3,710E+06	4,793E+06	4,745E+06	3,349E+06	7,090E+06	
Ndp130	7,330E+05	7,127E+05	7,027E+05	5,391E+05	1,000E+06	
Critério	D.perm.	D.perm.	D.perm.	D.perm.	D.perm.	
ΔN	0	-2,027E+04	-3,031E+04	-1,939E+05	2,671E+05	
ΔN [%]	0	-2,77	-4,13	- 26,46	+ 36,44	Total
ΔN entre simulações	0	-2,027E+04	-1,004E+04	-1,636E+05	4,610E+05	2,671E+05
ΔN [%] entre simulações	0	-2,77	-1,37	-22,32	62,89	36,44
ΔN [%] relativa	0	-7,59	-3,76	-61,27	172,62	100

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura analisada na amostra ao Km 73+000, conforme resultados expostos na tabela 6.11, apresenta um número eixos-padrão admissível na ordem de 1,000E+06, representando um acréscimo na ordem dos 36,44% face ao número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada (7,330E+05). No entanto, é de salientar a variação desfavorável, no desempenho da estrutura, dos fatores percentagem de betume, percentagem de filler e grau de compactação, conforme destaque da inclinação descendente da reta que define o número de eixos-padrão para os fatores em apreço, na figura 6.12.

Dentro dos fatores, com variação desfavorável, destaca-se o grau de compactação pela sua variação de -3.2%, resultando um grau de compactação de apenas 96,77%, fazendo diminuir, significativamente, o módulo de deformabilidade da camada de regularização.

Face à variação total do número de eixos-padrão, sentida na estrutura, neste caso, o grau de compactação assume um peso relativo na ordem dos -61,27%, seguido da percentagem de betume e da percentagem de filler com um peso relativo de apenas -7,59% e -3,76% respetivamente, como se pode evidenciar também pela inclinação descendente da reta do número de eixos-padrão para os referidos fatores na figura 6.12.

No entanto, como já foi referido, a estrutura revela um número de eixos-padrão admissível superior ao admitido pela estrutura projetada, tudo graças à variação favorável da espessura da camada de regularização, que passa de 7cm para 9cm *in situ*, acabando por assumir um peso relativo face à variação total do número de eixos-padrão na ordem dos 172,62%.

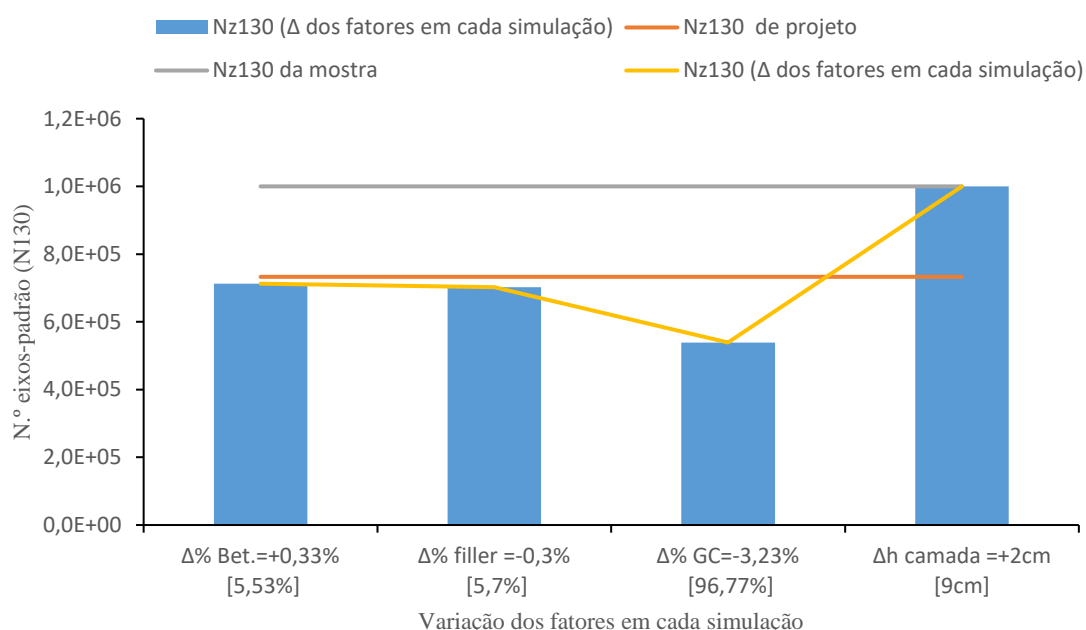


Figura 6.12 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 73+000 (faixa da esquerda)

12) Amostra ao Km 75+000 (faixa da esquerda) – Camada de regularização (MB-L)

Tabela 6.12 – Parametrização da amostra recolhida ao Km 75+000 na faixa da esquerda referente à camada de regularização/ligação

	Dados de Projeto (JAE)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	
		Δ % bet (-1,20%) *	Δ % Filler (-0,80%) *	Δ % G.C (-2,65%) *	Δ hcamada (-1,1cm) *	
% bet.	5,2	4,00	4,00	4,00	4,00	
% filler	6,0	6,00	5,20	5,20	5,20	
G.C [%]	100	100	100	97,35	97,35	
hcamada [cm]	7,0	7,0	7,0	7,0	5,9	
E [MPa]	4400	4792	4623	3800	3800	
ϵ_t	2,880E-04	2,759E-04	2,812E-04	3,117E-04	3,410E-04	
ϵ_{dp}	6,150E-04	6,018E-04	6,076E-04	6,402E-04	7,024E-04	
Nt130	3,710E+06	1,236E+06	1,198E+06	9,056E+05	5,779E+05	
Ndp130	7,330E+05	8,004E+05	7,702E+05	6,249E+05	4,313E+05	
Critério	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	D.permanente	
ΔN	0	6,735E+04	3,723E+04	-1,081E+05	-3,017E+05	
ΔN [%]	0	+ 9,19	+ 5,08	- 14,74	- 41,16	Total
ΔN entre simulações	0	6,735E+04	-3,013E+04	-1,453E+05	-1,937E+05	-3,017E+05
ΔN [%] entre simulações	0	9,19	-4,11	-19,82	-26,42	-41,16
ΔN [%] relativa	0	-22,32	9,98	48,16	64,18	100,00

(*) – diferença entre os valores previstos em projeto e os valores observados na respetiva amostra em estudo (anexo I)

A estrutura analisada na amostra ao Km 75+000, conforme resultados expostos na tabela 6.12, apresenta um número de eixos-padrão na ordem dos $4,313E+05$, o que significa uma diminuição na ordem dos -41,16% face ao número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada. Os principais fatores responsáveis por tamanha diminuição do número de eixos-padrão são a variação do grau de compactação e a espessura da camada de regularização, que acabaram por variar no sentido desfavorável ao desempenho da estrutura, conforme se pode observar pela inclinação descendente da reta que representa a variação do número de eixos-padrão, para cada fator em análise, na figura 6.13.

A espessura da camada sofre uma diminuição de 1,1cm, ficando com uma espessura final de 5,9cm., assumindo um peso relativo na diminuição total do número de eixos-padrão na ordem dos 64,18%.

No que respeita ao grau de compactação, este assume também importância relevante na diminuição do número de eixos-padrão, visto que a sua variação de -2,65%, passando o grau de compactação a 97,35%, provoca uma diminuição significativa no módulo de deformabilidade da camada, acabando por assumir um peso relativo, na variação total do número de eixos-padrão, na ordem dos 48,18%.

O fator percentagem de filler também acaba por sofrer uma variação no sentido desfavorável, no entanto, neste caso, face à sua pequena variação, acaba por ser pouco expressivo no resultado final quando comparado com a variação dos outros dois fatores (grau de compactação e espessura da camada).

O fator percentagem de betume é o único fator que sofre variação no sentido favorável ao desempenho da estrutura, no entanto não é suficiente para superar o diferencial “negativo” na diminuição do número de eixos-padrão provocado pelo conjunto desfavorável dos outros fatores.

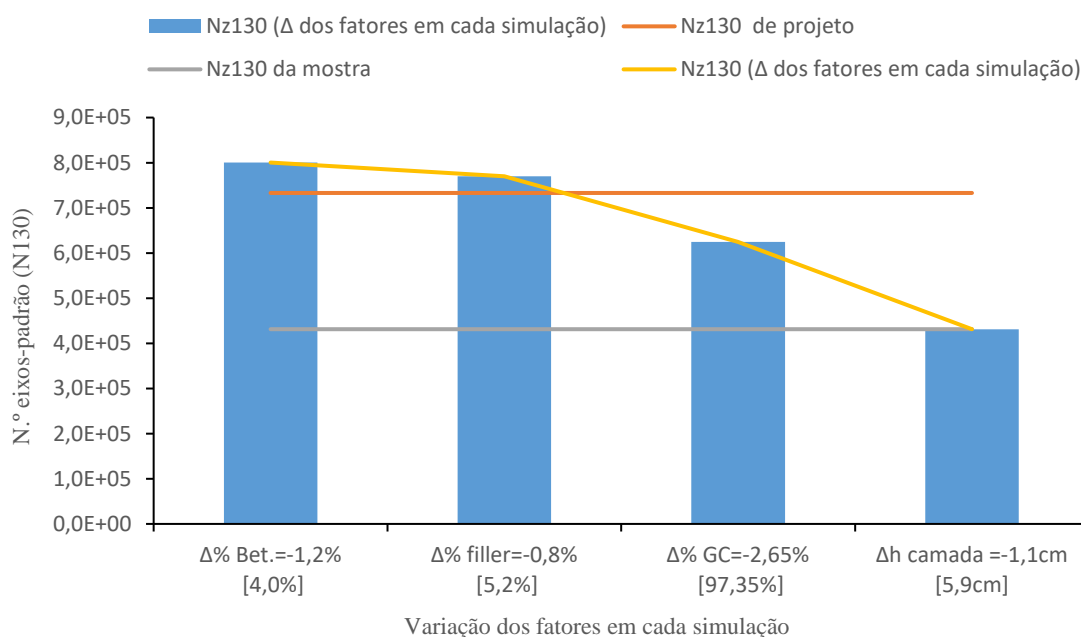


Figura 6.13 – Variação do N_{130} em função da variação dos fatores na amostra Km 75+000 (faixa da esquerda)

6.3.3 Conclusões

Na tabela 6.13 apresenta-se o resumo do número de eixos-padrão admissível por cada amostra analisada, assim como a influência relativa de cada fator na variação do número de eixos-padrão dentro da respectiva amostra, sendo representando pelo número de asteriscos (*) a influência de cada fator na variação do número de eixos padrão (apenas nas amostras que admitem um número de eixos padrão inferior número de eixos padrão admitidos pela estrutura de projeto).

Tabela 6.13 – Número de eixos-padrão admissível em cada amostra

Amostra	N ₁₃₀ Projeto	N ₁₃₀ Amostra	ΔN	ΔN [%]	Δ %bet	Δ % filler	Δ %G.C	Δ h _{camada}
Km 56+600 (d)	7,330E+05	6,558E+06	5,825E+6	797,35	0,09	0,18	- 0,61	100,34
Km 66+200 (d)	7,330E+05	1,266E+06	5,332E+05	72,74	-1,80	2,67	-13,84	112,97
Km 69+000 (d)	7,330E+05	6,364E+05	-9,662E+04	-13,18	-5,31	-3,49	108,80 (****)	0,00
Km 70+500 (d)	7,330E+05	2,396E+05	-4,934E+05	-67,32	3,55 (**)	0,84 (*)	40,03 (***)	55,59 (****)
Km 70+800 (d)	7,330E+05	2,408E+05	-4,922E+05	-67,15	3,56 (**)	-2,09	45,56 (***)	52,97 (****)
Km 72+500 (d)	7,330E+05	4,425E+05	-2,905E+5	-39,63	12,14 (*)	15,54 (**)	33,28 (***)	39,05 (****)
Km 56+700 (e)	7,330E+05	7,888E+05	5,576E+04	7,61	-17,19	-36,35	-233,20	386,75
Km 61+800 (e)	7,330E+05	3,935E+05	-3,395E+05	-46,32	0	5,70 (***)	5,61 (**)	88,70 (****)
Km 66+000 (e)	7,330E+05	1,833E+06	1,100E+6	150,06	-1,72	-3,33	-13,49	118,54
Km 72+700 (e)	7,330E+05	9,405E+05	2,075E+05	28,31	-7,32	-39,05	-60,84	207,21
Km 73+000 (e)	7,330E+05	1,000E+06	2,671E+05	36,44	-7,59	-3,76	-61,27	172,62
Km 75+000 (e)	7,330E+05	4,313E+05	-3,017E+05	-41,16	-22,32	9,98 (**)	48,16 (***)	64,18 (****)

Pelos resultados apresentados na tabela 6.13, verifica-se o seguinte:

- a) Em todas as amostras, o fator grau de compactação é o único que apresenta variação no sentido desfavorável ao desempenho da estrutura (diminuição do número de eixos-padrão);
- b) Dentro das amostras com número de eixos-padrão inferior ao previsto, ou seja ΔN negativo, os fatores que mais contribuíram para a diminuição do número de eixos-padrão foram a variação da espessura da camada e a variação do grau de compactação, podendo dizer-se que a espessura da camada, exceto na amostra ao km 69+000 (d), teve sempre maior peso relativo comparativamente com o grau de compactação, no que diz respeito à variação total do número de eixos padrão;
- c) Dentro das amostras com número de eixos-padrão superior ao previsto, ou seja ΔN positivo, o fator que mais contribuiu para o aumento do número de eixos-padrão foi a variação da espessura da camada, observando-se sempre um peso relativo em superior a 100%;
- d) A maioria das amostras, com número de eixos-padrão inferior ao previsto, situam-se na faixa da direita, ou seja, 4 ocorrências na faixa da direita e apenas 2 ocorrências na faixa da esquerda.

Com base nos resultados do número de eixos-padrão, admitidos por cada amostra, apresenta-se graficamente, na figura 6.14, a evolução espacial do número de eixos padrão ao longo do trecho em estudo.

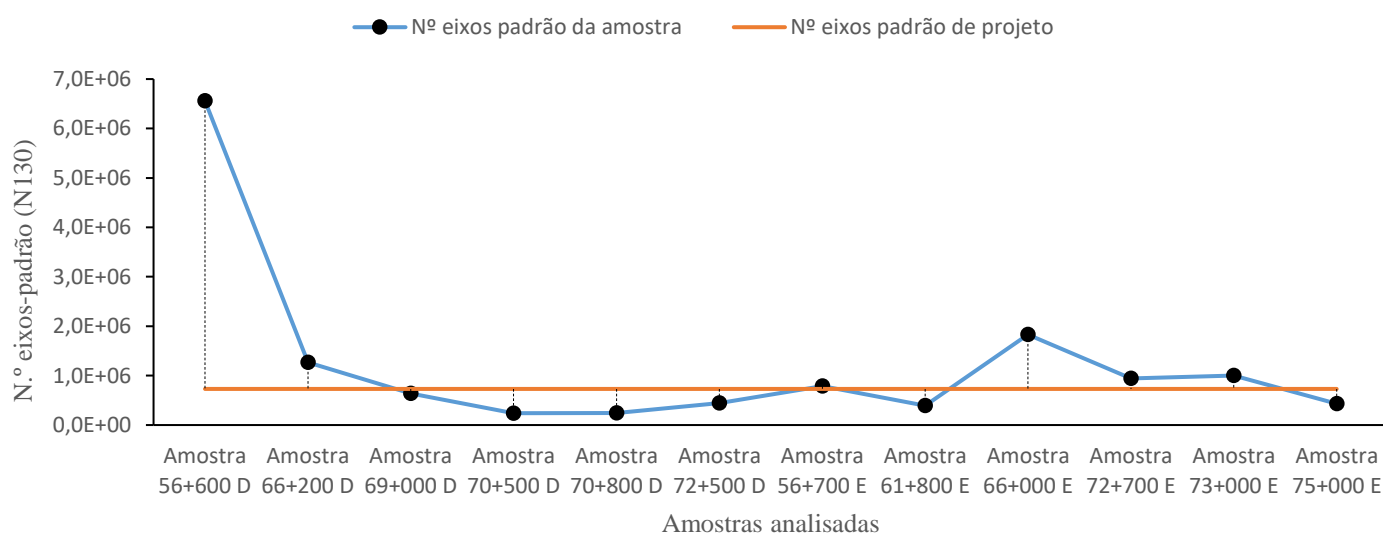


Figura 6.14 – Variação do N_{130} ao longo da estrada

Pela observação gráfica, figura 6.14, da reta que representa o número de eixos-padrão admitido por cada amostra ao longo do trecho em estudo, verifica-se o seguinte:

- a) Tanto na faixa da direita como na faixa de esquerda existem duas amostras, cujos valores do número de eixos-padrão, se afastam claramente, quer do número de eixos padrão previsto em projeto quer da tendência observado na variação do número de eixos-padrão das outras amostras. Este facto deve-se essencialmente ao aumento atípico da espessura da camada, como já se falou e referenciado no ponto 6.3.2.
- b) Os números de eixos-padrão, observados nas amostras da faixa da direita, são tendencialmente inferiores ao número de eixos-padrão admitidos em projeto. Nos quilómetros iniciais (faixa da direita) a tendência da diminuição do número de eixos-padrão é maior, decrescendo essa diminuição nos últimos quilómetros da respetiva faixa;
- c) Na faixa da esquerda, nos quilómetros iniciais e finais, o número de eixos-padrão é, tendencialmente, inferior ao previsto em projeto, sendo que, nos quilómetros intermédios, a maioria das amostras apresentam número de eixos-padrão superior ao previsto.

Na tabela 6.14 são apresentados o número de eixos padrão admissível por cada amostra, exceto os valores das amostras ao km 56+600 (d) e ao km 66+000 (e), devido apresentarem valores atípicos, sobretudo devido ao forte incremento da espessura da camada, revelando-se pouco característicos, quer dos valores observados nas outras amostras quer dos valores de referência.

Tabela 6.14 – Número de eixos-padrão admissível em cada amostra, exceto amostra Km 56+600 (d) e Km 66+000 (e)

Amostra	N ₁₃₀ Projeto	N ₁₃₀ Amostra	ΔN	ΔN [%]
Km 66+200 (d)	7,330E+05	1,266E+06	5,332E+05	72,74
Km 69+000 (d)	7,330E+05	6,364E+05	-9,662E+04	-13,18
Km 70+500 (d)	7,330E+05	2,396E+05	-4,934E+05	-67,32
Km 70+800 (d)	7,330E+05	2,408E+05	-4,922E+05	-67,15
Km 72+500 (d)	7,330E+05	4,425E+05	-2,905E+5	-39,63

Km 56+700 (e)	7,330E+05	7,888E+05	5,576E+04	7,61
Km 61+800 (e)	7,330E+05	3,935E+05	-3,395E+05	-46,32
Km 72+700 (e)	7,330E+05	9,405E+05	2,075E+05	28,31
Km 73+000 (e)	7,330E+05	1,000E+06	2,671E+05	36,44
Km 75+000 (e)	7,330E+05	4,313E+05	-3,017E+05	-41,16
	Σ	6,379E+06		
	N ₁₃₀ (médio)	6,379E+05		

Com base nos valores aferidos na tabela 6.14, apresenta-se na figura 6.15 a representação gráfica do número de eixos-padrão para cada amostra, excluindo as amostras ao Km 56+600 D e ao Km 66+000 E pelas razões já referidas, assim como o valor médio do número de eixos-padrão.

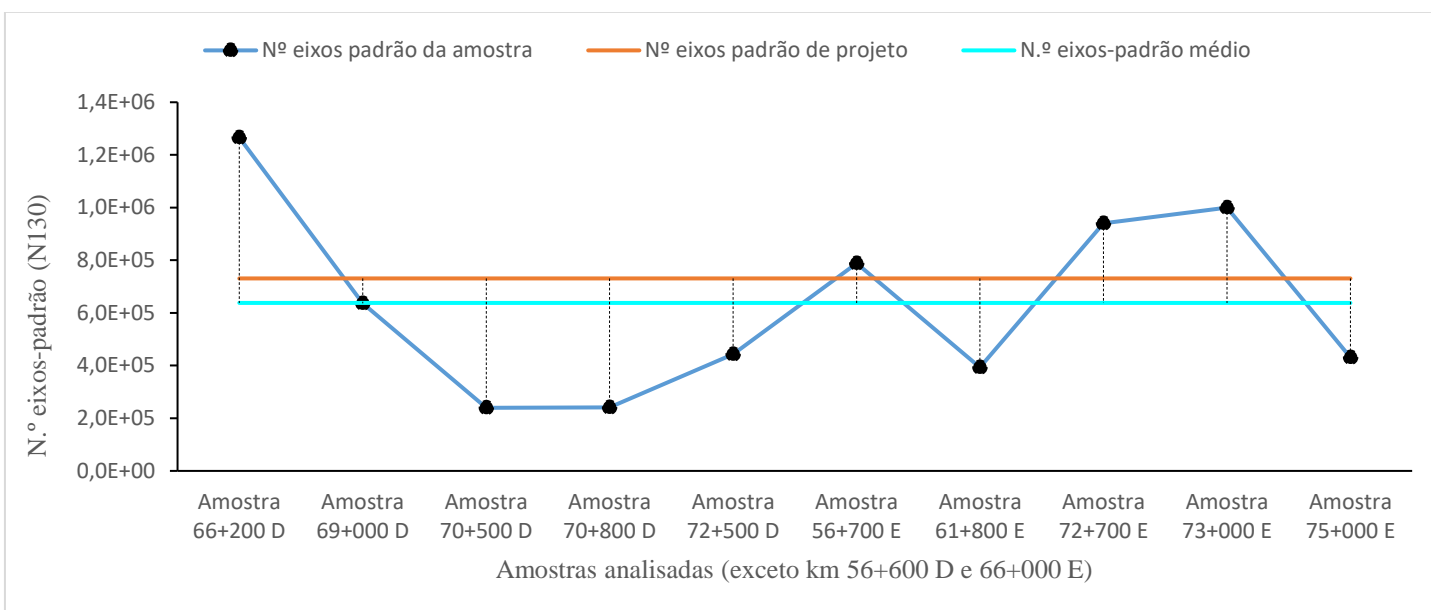


Figura 6.15 – Variação do N₁₃₀ ao longo da estrada (excluindo as amostras Km 56+600 D e 66+000 E)

Pela análise gráfica, da figura 6.15, observa-se que o número médio de eixos-padrão, admitido pelo trecho em estudo, se situa abaixo do número de eixos-padrão previsto em projeto, sendo o seu valor médio na ordem dos 6,379E+05, representando uma diminuição do número de eixos-padrão em relação ao previsto na ordem dos 13%. De um modo geral, pode dizer-se que tais

variações, sentidas nos fatores analisados, em nada beneficiam o bom desempenho do pavimento.

6.4 Apresentação/levantamento das degradações

À data do estudo em causa, efetuou-se o registo das degradações existentes ao longo da extensão da estrada em estudo, com destaque para os trechos analisados no item anterior, no intuito de poder vir a estabelecer alguma relação “causa/efeito” entre as características paramétricas resultantes das amostras analisadas e as degradações observadas.



Figura 6.1 a) – Cruzamento EN 221 com a EN 315 km 56+600 (f.d) e km 56+700 (f.e)



Figura 6.1 b) – Estado atual do pavimento no cruzamento EN 221 com a EN 315

Os trechos ao km 56+600 (faixa da direita) e km 56+700 (faixa da esquerda) são coincidentes com a zona de cruzamento de Castelo Branco entre a EN 221 e a EN 315, encontrando-se atualmente inseridos nos nós de ligação com o atual IC5 conforme se pode ver pela figura 6.1 a). Como se pode observar na figura 6.1 b), estes dois trechos (km 56+600 f.d e km 56+700 f.e) encontram-se repavimentados e possivelmente, alterados quanto ao seu traçado original, fruto da interligação com recente construção do IC5, não sendo possível observar/avaliar quaisquer tipo de degradações que possam ter vindo a existir nestes trechos.

Tanto a estrutura do pavimento analisado ao km 56+600 (faixa da direita) como ao km 56+700 (faixa da esquerda), admitem um número de eixos-padrão admissível superior ao número de eixos-padrão admissível pela estrutura projetada, conforme valores apresentado nas tabelas 6.1 e 6.7, respetivamente, podendo admitir-se, em condições normais, que as degradações, caso tenham existido, seriam pouco significativas.



Figura 6.2) – Estado de degradação do pavimento ao km 66+200 (faixa da direita)



Figura 6.3) – Estado de degradação do pavimento ao km 70+800 (faixa da direita)

Ao longo da extensão beneficiada, as degradações são repetitivas, sendo, genericamente, evidenciado o fendilhamento e a deformação do pavimento. Quanto ao fendilhamento destacam-se as fendas longitudinais, quer junto à berma, quer junta ao eixo da estrada. Também é observável com bastante frequência a pele de crocodilo, tanto em malha larga (lado da malha ≥ 40 cm), como em malha estreita (lado da malha < 40 cm).

No que respeita às deformações, observa-se com bastante frequência o abatimento longitudinal quer junto da berma quer ao longo do eixo da faixa de rodagem. Também é observável com bastante frequência o aparecimento de rodeiras, quer de pequeno raio quer de grande raio, na zona de passagem dos rodados.

6.4.1 Conclusões

Com base no levantamento fotográfico do estado em que se encontra o pavimento, à data do estudo, as degradações mais frequentes são o aparecimento de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas.

Entre estas duas famílias de degradações existe uma forte interação e sequência das mesmas, podendo uma deformação excessiva contribuir para evolução do fendilhamento, mas também um fendilhamento contribuirá decisivamente para o aumento da deformação em geral (Branco et al, 2011).

Atendendo aos critérios de ruína, tendo-se constatado que o critério preponderante foi sempre a deformação permanente e a base (macadame hidráulico existente) apresentar baixo módulo de rigidez, pode dizer-se para o caso em estudo, com bastante probabilidade, que a primeira degradação aparecer foi a deformação, tendo potenciado o aparecimento do fendilhamento.

De acordo com os resultados paramétricos, efetuados para cada amostra em estudo, verifica-se a existência de falhas quer ao nível da execução quer ao nível da fabricação.

Ao nível da execução destaca-se o deficiente grau de compactação assim como diminuição da espessura da camada, que em nada contribuem para o bom desempenho estrutural do pavimento. Um grau de compactação deficiente seguido de uma diminuição da espessura da camada tornará a estrutura mais sensível às ações que a solicitem, induzindo à estrutura um estado de tensão superior, sob o mesmo tipo de ações, potenciando o aparecimento das degradações, nomeadamente o fendilhamento.

Ao nível do fabrico são evidentes falhas quer na dosagem de betume quer na dosagem de *filler*. Uma dosagem por defeito, de betume e do *filler*, faz com que diminua a fração de “mástique” (betume mais *filler*), diminuindo assim a área de contacto entre as partículas, favorecendo deste modo a formação de fendas. Por outro lado, a dosagem por excesso de betume torna a estrutura mais flexível, logo menos propensa à formação de fissuras, mas prejudica, por sua vez, o bom desempenho da camada sob o ponto de vista das deformações permanentes.

6.5 Caracterização estatística das variáveis em estudo

Durante o processo construtivo, por diversas razões, ocorrem desvios nos valores considerados em sede de projeto, das variáveis envolvidas no dimensionamento do pavimento, que, por sua vez, condicionam a durabilidade do mesmo.

Como já referido, anteriormente, para efeito do presente estudo, as variáveis alvo, de tratamento estatístico, neste ponto são:

- Percentagem de betume;
- Percentagem de *filler*;
- Grau de compactação/porosidade;
- Espessura da camada (regularização).

Para cada uma das variáveis analisadas determinaram-se estatísticas de localização, como média, mediana, moda, máximo, mínimo e percentil, e estatísticas de dispersão como desvio padrão e amplitude.

São apenas doze (12), o número de amostras inquiridas, para as quais foi possível obter dados relativos às variáveis em estudo, conforme caracterização paramétrica no ponto 6.3.2.

Quer por razões de ordem económica, quer por razões de ordem técnica, dificilmente serão atingidos *in situ*, os valores dos variáveis considerados em projeto. Por esta razão, e de modo a estabelecer “critérios de aceitação/rejeição para unidades terminadas”, o caderno de encargos do tipo ICERR (março de 1998), estabelece as características dos materiais e respetivas tolerâncias durante a sua fabricação/aplicação.

Para misturas betuminosas fabricadas a quente, o caderno de encargos estabelece as seguintes tolerâncias:

- Material que passa no peneiro n.º 200 (filler): $\pm 1\%$;
- Percentagem de betume: $\pm 0,3\%$;
- Grau de compactação: $\geq 98\%$;
- Cota da camada: não são permitidas diferenças de cota superiores a 15mm relativamente à cota de projeto;
- Espessura média $\geq 95\%$ da espessura de projeto (neste caso $\geq 6,65\text{cm}$). Para camadas de ligação a espessura recomendável pelo MACOPAV, anda na ordem dos 5 a 8cm.

Nas tabelas 6.13, 6.14 e 6.15, de acordo com as tolerâncias admissíveis pelo caderno de encargos, apresentam-se os valores máximos e mínimos admissíveis para as variáveis em estudo.

Tabela 6.13 – Valores máximos e mínimos admissíveis para a percentagem de betume

	Tolerância	P _{bet.}
Mínimo	-0,3%	4,9%
Valor do estudo	-	5,2%
Máximo	+0,3%	5,5%

Tabela 6.14 – Valores máximos e mínimos admissíveis para a percentagem de filler

	Tolerância	P _{bet.}
Mínimo	-1%	5,0%
Valor do estudo	-	6,0%
Máximo	+1%	7,0%

Tabela 6.15 – Valores máximos e mínimos admissíveis para espessura da camada

	Caderno de encargos	MACOPAV
Mínimo	Esp. média $\geq 6,65\text{cm}$ (*)	5cm
Valor do estudo	7cm	-
Máximo		8cm

(*) Espessura média $\geq 95\%$ da espessura de projeto (7cm) \rightarrow esp. média $\geq 6,65\text{cm}$.

Grau de compactação $\geq 98\%$;

6.5.1 Caracterização estatística da percentagem de betume

As estatísticas determinadas para a percentagem de betume são apresentadas na tabela 6.15, encontrando-se patentes na tabela I.1 do anexo I os dados recolhidos que serviram de base à elaboração das respetivas estatísticas.

Dos valores apresentados na tabela 6.15, relativos à percentagem de betume, constata-se que o valor médio observado de 5,25%, anda muito próximo do valor previsto em sede de formulação (5,20%).

Tabela 6.15 – Medidas estatísticas determinadas para a percentagem de betume

% Prevista em estudo de formulação (JAE)	5,20
N.º de observações	12
Média [%]	5,25
Mediana [%]	5,35
Moda [%]	5,00 e 5,47 (*)
Desvio Padrão [%]	0,46
Coefficiente de variação [%]	0,09
Máximo [%]	5,89
Mínimo [%]	4,00
Amplitude [%]	1,89
85º Percentil [%]	5,51
15º Percentil [%]	5,00

(*) – São evidenciados dois valores de % de betume, ambos com a mesma frequência - Tabela I.1 do anexo

Embora a quantidade média do betume seja idêntica ao valor previsto, as observações mais frequentes apresentam valores distantes da média e da quantidade prevista, como se pode observar pelos valores da moda, 5,00% e 5,47%. No entanto, os valores modais (5 e 5,47%), mesmo que distantes do valor previsto, encontram-se dentro dos limites admissíveis pelo caderno de encargos [4,9% a 5,5%].

Os valores obtidos para o desvio padrão (0,46%) e amplitude (1,89%) indicam que a amostra é algo dispersa em relação à média. No entanto, como se pode ver na tabela 6.16 e pelo gráfico associado, figura 6.13, o intervalo admissível para a variação do betume [4,9% a 5,5%] contém cerca de 75% das observações, sendo apenas 8,33% das observações inferiores ao limite mínimo admissível e 16,67% das observações superiores ao limite máximo admissível.

Tabela 6.16 – Resultados estatísticas da frequência relativa dos dados recolhidos para a percentagem de betume

% bet	N.º Observações	Fr [%]	FRac [%]
< 4,90	1	8,33	8,33
[4,90; 5,50]	9	75,00	83,33
>5,50	2	16,67	100

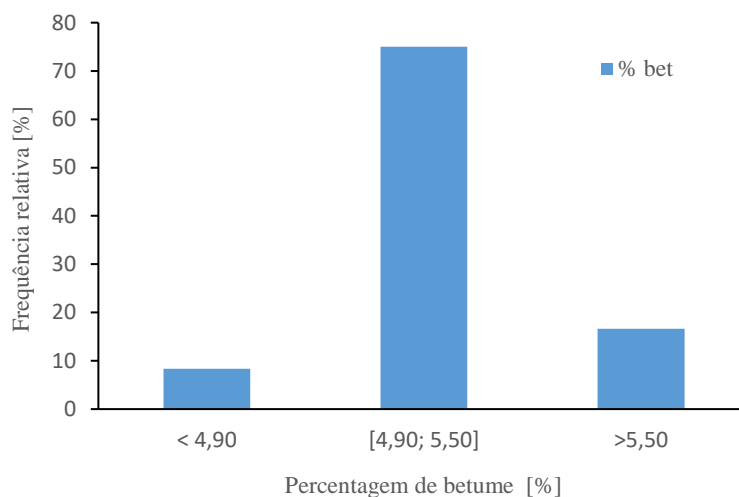


Figura 6.13 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para a percentagem de betume

6.5.2 Caracterização estatística da percentagem de filler

Na tabela 6.17 apresentam-se as estatísticas determinadas para a percentagem de filler, encontrando-se patentes na tabela I.2 do anexo I os dados recolhidos que serviram de base à elaboração das respetivas estatísticas.

Analisando os resultados estatísticos relativos à percentagem de filler apresentados na tabela 6.17, verifica-se que o valor médio da percentagem de filler (5,49%) é inferior ao valor previsto

em sede de projeto (6%). Embora a moda (valor mais frequente) seja de 6,30%, superior ao valor esperado, olhando para o desvio padrão e para a amplitude percebe-se que a amostra é dispersa relativamente ao valor médio.

Tabela 6.17 – Medidas estatísticas determinadas para a percentagem de filler

% Previsto em estudo de formulação (JAE)	6,00
N.º de observações	12
Média [%]	5,49
Mediana [%]	5,65
Moda [%]	6,30
Desvio Padrão [%]	0,85
Coefficiente de variação [%]	0,15
Máximo [%]	6,40
Mínimo [%]	3,50
Amplitude [%]	2,90
85º Percentil [%]	6,30
15º Percentil [%]	4,80

Analisando a tabela 6.18 e o gráfico associado da figura 6.14, constata-se que o intervalo admissível para a variação da percentagem de filler [5 a 7%] contém, sensivelmente, 75% das observações, ficando aproximadamente 25% das observações abaixo do limite mínimo admissível, acabando por contribuir de certa forma para um valor da média inferior ao valor de referência. Também é de salientar que não são verificadas quaisquer observações acima do limite superior admissível.

Tabela 6.18 – Resultados estatísticas da frequência relativa dos dados recolhidos para a percentagem de filler

% filler	N.º Observações	Fr [%]	FRac [%]
< 5,00	3	25,00	25,00
[5,00; 7,00]	9	75,00	100,00
>7,00	0	0,00	100,00

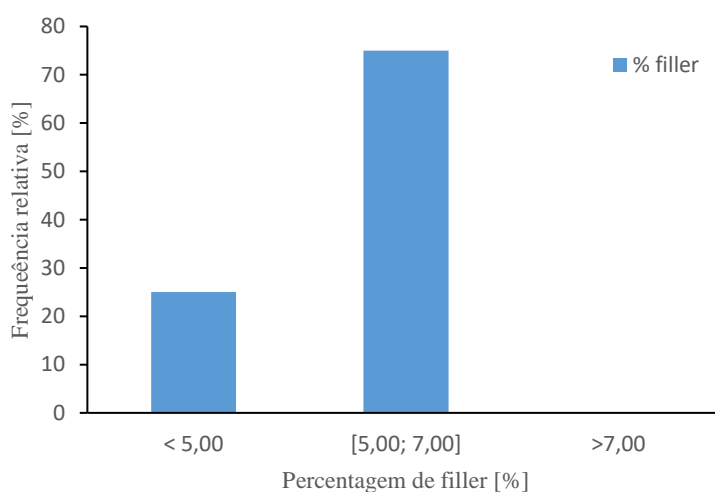


Figura 6.14 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para a percentagem de *filler*

6.5.3 Caracterização estatística do grau de compactação (G.C)

Na tabela 6.19, encontram-se as estatísticas determinadas para o grau de compactação, encontrando-se na tabela I.3 do anexo I os dados recolhidos que serviram de base à elaboração das respetivas estatísticas.

Da análise dos valores estatísticos, apresentados na tabela 6.19, referentes ao grau de compactação, salienta-se que tanto a média observada (97,53%), como a mediana (97,43%) são valores inferiores ao valor mínimo admissível pelo caderno de encargos.

Tabela 6.19 – Medidas estatísticas determinadas para o grau de compactação

% Previsto em estudo de formulação (JAE)	100,00
N.º de observações	12
Média [%]	97,53
Mediana [%]	97,43
Moda [%]	-
Desvio Padrão [%]	1,23
Coefficiente de variação [%]	0,01
Máximo [%]	99,40
Mínimo [%]	95,45
Amplitude [%]	3,95
85º Percentil [%]	98,83
15º Percentil [%]	96,38

Pela proximidade dos valores entre a média e a mediana, pode dizer-se que a amostra apresenta pouca dispersão em relação à média, sendo que a mediana é mais robusta que a média a erros ou a observações afastadas.

Sendo a mediana o valor central da amostra, que divide a amostra em duas partes iguais, com 50% das observações acima e abaixo dela, conclui-se que metade das observações são inferiores ou iguais ao valor da mediana (97,43%), contribuindo decisivamente para um valor médio inferior ao valor mínimo esperado para o grau de compactação.

Observando os resultados obtidos da frequência relativa, respeitante aos dados do grau de compactação, apresentados na tabela 6.20 e o respetivo gráfico ilustrado na figura 6.15, salienta-se que mais de metade das observações, cerca de 58%, não cumprem o limite mínimo do grau de compactação esperado.

Tabela 6.20 – Resultados estatísticos da frequência relativa dos dados recolhidos para o grau de compactação.

% G.C	N.º Observações	Fr [%]	FRac [%]
<98	7	58,33	58,33
≥ 98	5	41,67	100,00

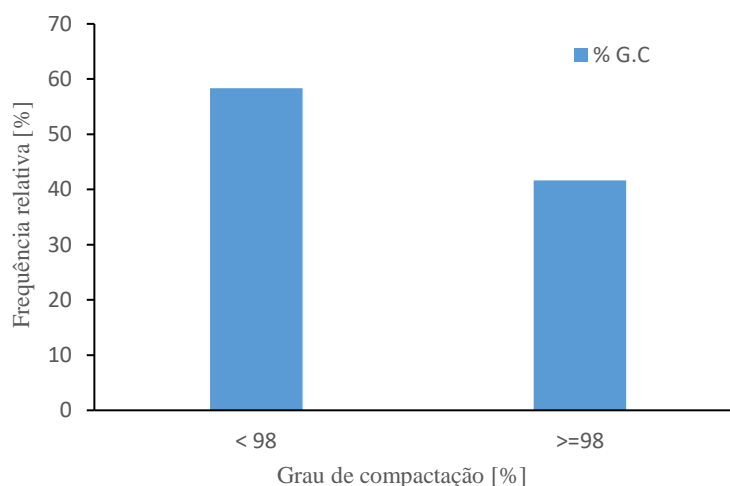


Figura 6.15 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para o grau de compactação

6.5.4 Caracterização estatística da espessura da camada (hcamada)

As estatísticas determinadas para a espessura da camada são apresentadas na tabela 6.21, encontrando-se na tabela I.4 do anexo I os dados recolhidos que serviram de base à elaboração das respetivas estatísticas.

Dos valores obtidos na tabela 6.20, relativos às estatísticas da espessura da camada, destaca-se o valor médio da espessura da camada de 7,93cm, logo superior ao admitido em sede de formulação. O valor obtido para a moda de 9,0cm revela também que o valor observado com maior frequência é superior ao valor esperado.

Tabela 6.20 – Medidas estatísticas determinadas para a espessura da camada

Previsto em estudo de formulação (JAE) [cm]	7,00
N.º de observações	12
Média [cm]	7,93
Mediana [cm]	7,50
Moda [cm]	9,00
Desvio Padrão [cm]	2,85
Coefficiente de variação [cm]	0,36
Máximo [cm]	14,50
Mínimo [cm]	4,90
Amplitude [cm]	9,60
85º Percentil [cm]	9,77
15º Percentil [cm]	5,29

Observando as diferenças entre os valores da média, moda e mediana, verifica-se que a amostra é algo assimétrica, registando também grande dispersão de dados, como se constata pelo significativo valor do desvio padrão e pela elevada amplitude.

Olhando para o valor do intervalo da espessura recomendada pelo MACOPAV, tabela 6.21 e respetivo gráfico da figura 6.16, observasse que, apenas, sensivelmente 42% das observações cumprem o intervalo proposto pelo MACOPAV. Salienta-se ainda que, aproximadamente 16% das observações se encontram abaixo do limite inferior do intervalo, sendo que, sensivelmente 42% das observações se situam acima do limite superior admitido pelo MACOPAV, assumindo, estes últimos, importância relevante no valor médio da espessura da camada acima do previsto.

Tabela 6.21 – Resultados estatísticas da frequência relativa dos dados recolhidos para a espessura da camada (intervalos recomendados pelo MACOPAV)

h_{camada} [cm]	N.º Observações	Fr [%]	FRac [%]
<5,00	2	16,67	16,67
[5,00; 8,00]	5	41,67	58,33
$\geq 8,00$	5	41,67	100,00

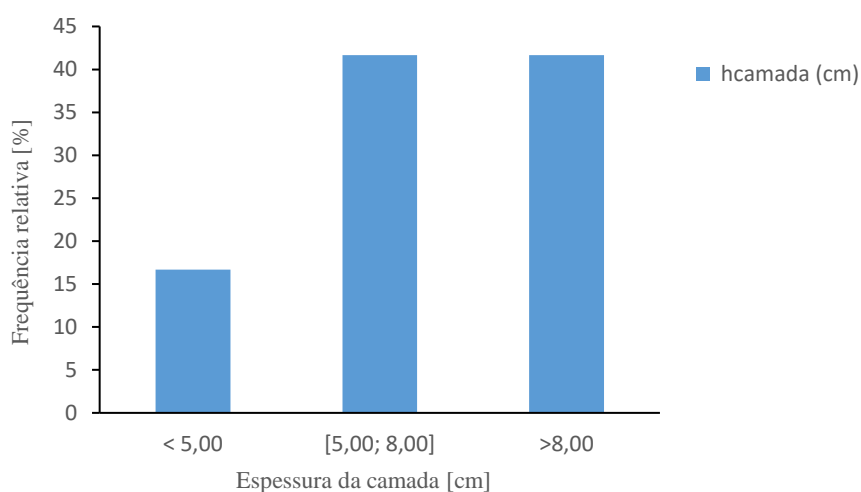


Figura 6.16 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para a espessura da camada (intervalos recomendados pelo MACOPAV)

Embora a camada apresente uma espessura média superior ao previsto, é de salientar que, sensivelmente, 42% das observações apresentam espessura inferior à espessura prevista em sede de formulação, como se pode constatar pelos resultados estatísticos apresentados na tabela 6.22 e respetivo gráfico da figura 6.17. Constata-se que, apenas, cerca de 16% das observações cumprem o intervalo formado pela espessura prevista em sede de formulação (7cm) e o máximo recomendável pelo MACOPAV (8cm), sendo que aproximadamente 83% das observações ficam fora de tal intervalo [7 a 8cm].

Tabela 6.22 – Resultados estatísticas da frequência relativa dos dados recolhidos para a espessura da camada (espessura mínima imposta em sede de formulação)

h_{camada} [cm]	N.º Observações	Fr [%]	FRac [%]
<7,00	5	41,67	41,67
[7,00; 8,00]	2	16,67	58,33
$\geq 8,00$	5	41,67	100,00

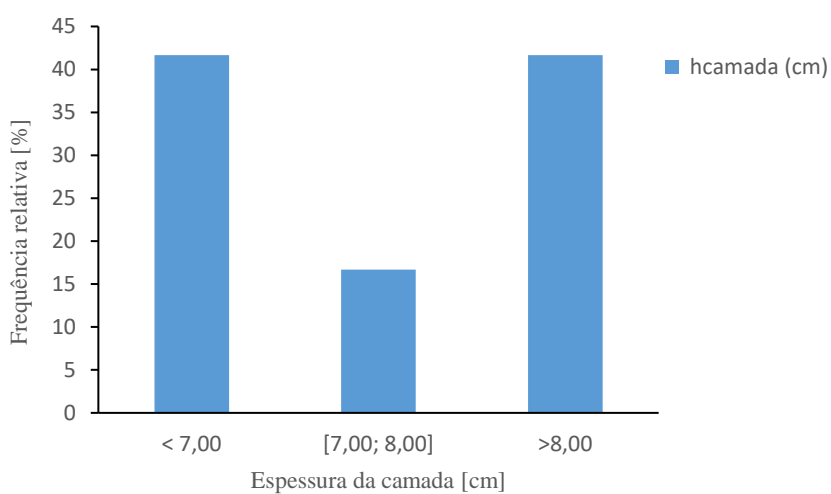


Figura 6.16 – Gráfico da frequência relativa dos dados recolhidos para a espessura da camada (espessura mínima imposta em sede de formulação)

6.5.5 Conclusões

Na tabela 6.23 apresenta-se o resumo dos valores médios, máximos e mínimos obtidos em função das amostras recolhidas *in situ*.

Tabela 6.23 – Variação dos valores obtidos *in situ* em relação aos valores previstos em projeto

	Previsto	Valores obtidos <i>in situ</i>			Variação percentual em relação ao previsto		
		Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
% betume	5,20 %	5,25 %	5,89 %	4,00 %	+ 0,96 %	+ 13,26 %	- 23,08 %
% <i>filler</i>	6,00 %	5,49 %	6,40 %	3,50 %	- 8,50 %	+ 6,67 %	- 41,67 %
G.C	100 %	97,53 %	99,40 %	95,45 %	- 2,47 %	- 0,60 %	- 4,55 %
h_{camada}	7,00 cm	7,93 cm	14,50 cm	4,90 cm	+ 13,29 %	+ 107,14 %	- 30,00 %

No que respeita à percentagem de betume, verifica-se que a variação percentual média é positiva, + 0,96% relativamente ao previsto, podendo dizer-se, que em média, o pavimento, neste caso a camada de regularização, apresenta um aumento da capacidade resistente à fadiga por flexão. Já por sua vez, tal variação, agrava o bom desempenho da camada sob o ponto de vista da deformação permanente, tendo-se verificado, já anteriormente, que o critério preponderante do dimensionamento das diferentes estruturas analisadas era a ruína por deformação permanente.

Comparativamente com as outras variáveis, a percentagem de *filler* e o grau de compactação, são aquelas que apresentam variação percentual média negativa, respetivamente, -8,5% e -2,7%, relativamente aos valores previstos, sendo certo, quer a redução média da percentagem de *filler*, quer a redução média do grau de compactação, em nada beneficiam o desempenho do pavimento.

Relativamente à espessura da camada, apresenta uma variação percentual média positiva de +13,29%, quanto ao valor previsto, destacando-se das outras variáveis, em termos absolutos, com maior variação média percentual. Pode dizer-se que tal variação, contribuirá, de um modo geral, para o bom desempenho do pavimento.

Na tabela 6.24, apresenta-se a comparação dos valores médios obtidos *in situ* com as especificações impostas pelo C.E

Tabela 6.24 – Comparação dos valores médios, máximos e mínimos, obtidos *in situ*, com as tolerâncias impostas pelo C.E relativamente aos valores de projeto

	Média	Máximo	Mínimo	C.E
% betume	5,25 %	5,89 %	4,00 %	[4,90; 5,50] %
% <i>filler</i>	5,49 %	6,40 %	3,50 %	[5,00; 7,00] %
G.C	97,53 %	99,40 %	95,45 %	≥ 98 %
h_{camada}	7,93 cm	14,50 cm	4,90 cm	[5,00; 8,00] cm (1) [7,00; 8,00] cm (2)

(1) – Intervalo recomendado pelo MACOPAV

(2) – Intervalo balizado pelo limite inferior igual a espessura prevista em projeto e limite superior recomendado pelo MACOPAV

Comparando os valores médios das variáveis em estudo, apresentados na tabela 6.24, verifica-se que, à exceção do grau de compactação, todas as restantes variáveis se enquadram dentro dos limites estabelecidos pelo C.E.

Analisando os valores máximos e mínimos, obtidos na fase de caracterização estatística das variáveis em estudo, com os limites impostos pelo C.E, verifica-se o seguinte:

- a) A variabilidade da percentagem de betume e da espessura da camada ultrapassam os limites definidos pelo C.E;
- b) Para a percentagem de *filler* e o grau de compactação, apenas a variabilidade máxima respeita o respetivo limite imposto pelo C.E, ficando os valores mínimos observados, quer da percentagem de *filler*, quer do grau de compactação, abaixo dos limites inferiores impostos pelo C.E.

7. CONCLUSÕES FINAIS

No presente capítulo apresenta-se uma síntese das principais conclusões obtidas com a realização deste estudo, suas limitações e sugestões de desenvolvimentos futuros.

O enquadramento teórico e a pesquisa bibliográfica contribuíram para o aprofundamento de conceitos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

7.1 Principais conclusões

O estudo consistiu na avaliação do número de eixos-padrão de 130kN, em função da variabilidade dos valores dos fatores presentes nas amostras de controlo do processo construtivo de uma camada betuminosa inserida na beneficiação de um troço de pavimento flexível no concelho de Mogadouro.

Como principal conclusão pode dizer-se, para o caso de estudo em concreto, que o pavimento apresenta, de um modo geral, um número médio de eixos-padrão inferior ao esperado, cerca de 13% abaixo do número de eixos-padrão previsto em projeto, tendo sido os fatores de obra os principais responsáveis pela fadiga do pavimento.

Com os dados disponíveis, de doze amostras, e a necessidade de promover a caracterização paramétrica das amostras, foi possível caracterizar estatisticamente fatores como a percentagem de betume, material que passa no peneiro n. °200 (*filler*), grau de compactação e espessura/altura da camada betuminosa de regularização.

Dos resultados relativos ao estudo dos fatores de erro no dimensionamento dum pavimento flexível, destaca-se o seguinte:

- 50% das amostras analisadas, dum total de doze, revelam um número acumulado de eixos-padrão de 130kN inferior ao previsto;
- analisando apenas dez amostras, excluindo as amostras Km 56+600 (d) e Km 66+000 (e) por apresentarem desvios significativos (não representativos) dos valores da espessura da camada, a percentagem de amostras com número acumulado de eixos-padrão inferior ao previsto sobe para 60%;
- as degradações mais frequentes são o aparecimento de deformações permanentes e o fendilhamento das camadas betuminosas;

- do ponto de vista do dimensionamento (amostras analisadas), o critério preponderante é o da deformação permanente;
- das amostras com número de eixos-padrão inferior ao previsto, os fatores que mais contribuíram para a diminuição do número de eixos-padrão foram, a espessura da camada e o grau de compactação. Nas amostras com número de eixos-padrão superior ao previsto, o fator que mais contribuiu para o aumento do número de eixos-padrão foi a espessura da cama;
- comparando os valores médios dos fatores em estudo, com os valores previstos, observa-se que o valor médio da percentagem de betume e da espessura da camada se situam acima do valor previsto em sede de projeto. Já o valor médio da percentagem de *filler* e do grau de compactação ficam, francamente, aquém do esperado;
- comparando a variabilidade dos fatores estudados com os limites impostos pelo caderno de encargos, observa-se que 83% das observações da espessura da camada, 58,33% das observações do grau de compactação e 25% das observações, quer da percentagem de *filler* quer da percentagem de betume, se encontram fora dos limites definidos pelo C.E.
- analisando os indicadores estatísticos pode dizer-se, de um modo geral, que todas as amostras, para cada fator analisado, apresentam grande dispersão de dados, como se observa pelos elevados valores do desvio padrão e da amplitude;
- em termos de variações máximas e mínimas, a fator espessura da camada é o que apresenta maior amplitude e também maior variação média em relação ao valor previsto;

De acordo com as conclusões enumeradas, bem como dos dados que serviram de base ao estudo, considera-se que os fatores relacionados com o processo de construção (grau de compactação e espessura da camada) foram os principais responsáveis pelas degradações e consequente ruína do pavimento.

Atendendo à variabilidade dos valores observados, nas campanhas de amostragem, pode dizer-se que o controlo dos fatores relacionados com a fabricação (percentagem de betume e percentagem de *filler*) é melhor sucedido comparativamente com o controlo dos fatores de execução.

Pensa-se que com este estudo se tenha demonstrado o quão importante é controlar, rigorosamente, todos os fatores envolvidos, quer no fabrico de misturas betuminosas quer na sua aplicação, assim como das técnicas de execução dos pavimentos, de modo a poder adotar medidas de correção atempadamente, tanto na fase de execução, como depois durante as ações de manutenção/beneficiação na fase de exploração.

7.2 Limitações

Embora se considere que os resultados obtidos foram conclusivos, existem sempre limitações neste tipo de trabalhos.

Uma das limitações patente foi o número reduzido de amostras completas ou com dados suficientes capazes de proporcionarem a parametrização dos fatores em estudo, conduzindo assim a uma caracterização estatística mais modesta dos fatores envolvidos. É de salientar que entre a execução da beneficiação e o estudo em causa, existe uma janela temporal de sensivelmente de vinte anos (execução da beneficiação fim de 1998 início 1999), sendo suscetível a perda ou mais difícil de reunir os respetivos boletins de amostragem em arquivo.

Outra das limitações do estudo foi a reduzida, quase inexistente, informação sobre a camada de desgaste, ficando assim o estudo limitado à variabilidade dos fatores patentes na camada de regularização.

Não menos importante, outras das limitações/dificuldades depreende-se com a existência de duas empresas envolvidas no processo de execução, estando também uma delas envolvida ao mesmo tempo no processo de fabrico, o que constituiu alguma dificuldade e morosidade no processo de análise e tratamento dos boletins de amostragem, tendo-se constatado boletins à saída da central sem correspondência ao troço em que foi aplicado e por quem.

7.3 Desenvolvimentos futuros

Tendo em conta as limitações e dificuldades explanadas, é opinião do autor que o trabalho efetuado levou a resultados e conclusões úteis, evidenciando a importância dos diferentes fatores envolvidos na execução dum pavimento flexível e prováveis causas das suas degradações.

Este tema deixa em aberto uma série de problemáticas para desenvolvimentos futuros em diversas direções. Sabendo que a qualidade de um pavimento requer a procura de melhores matérias e mais económicas, sugere-se que os trabalhos futuros mais relevantes neste campo devam estar relacionados com práticas e técnicas de execução, métodos de fabrico, controlos de qualidade, tipos de materiais a utilizar quer do ponto de vista da qualidade quer do ponto de vista económico.

Sugere-se o melhoramento dos resultados apresentados neste trabalho, considerando o aumento do número de amostras, tornando-a mais diversa, assim como a contemplação da camada de desgaste neste tipo de abordagem, dando a perceber em que camadas os erros são mais frequentes.

Propõe-se também a extensão deste estudo a outras obras/troços, com o intuito de estabelecer a frequência dos diferentes erros e a que nível ocorrem.

Em trabalhos futuros desta natureza, considera-se, como pertinente, estudar situações que visem a variação dos parâmetros do solo de fundação, camadas granulares e influencia dos sistemas de drenagem no estado dos pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHO, 1986. *AASHTO Guide for Design of Pavements Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.

Almeida, L.C., (2013). *"Técnicas de Conservação e de Reabilitação para Pequenas Reparações de Pavimentos Rodoviários"*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil: Geotecnia e Ambiente. Universidade da Beira Interior. Covilhã.

Alves, T. S. F., (2007). *"Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários. Aplicação Prática do Radar de Prospecção e do Deflectómetro de Impacto"*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Antunes, M. d., Branco, F., & Barros, R. (2004). *"Avaliação "IN-SITU" das Condições de Fundação dos Pavimentos Rodoviários com Base em Ensaios de Carga"*.

Antunes, M. L. (2005). *"Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis"*. LNEC. Junho de 2005. Lisboa.

Antunes, M. L. (2005). *"Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis"*. LNEC. Junho de 2005. Lisboa.

Azevedo, J. F.M. (2013). *"Avaliação do desempenho a longo prazo de pavimentos flexíveis: exploração da base de dados LTPP americana"*. Dissertação Para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra.

Azevedo, M. (1993). *"Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos"*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa.

Balay, J., Correia, A. G., Jouve, P., Horny, P., Paut, J. L. (1998). *"Étude Expérimentale et Modélisation du Comportement Mécanique des Grave Non Traitées et des sols supports de Chaussées - Dernières Avancées"*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – 216, pp. 3 – 18.

Barbosa, L. F. (1984). *"O Dimensionamento de pavimentos Flexíveis, de Estradas e de Aeródromos e dos seus Reforços"*. Tese para obtenção do grau de mestre, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Boussinesq, J. (1885). *"Application des Potentiels à L'étude de L'équilibre et du Mouvement des Corps Élastiques"*. Gauthier Villars, Paris

Brás, M.I.M., (2012). *"Validação Estrutural dos pavimentos Flexíveis indicados no Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional"*. Dissertação para Obtenção do grau de mestre em engenharia civil - especialização em vias de comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto

Burmister, D. M. (1945). *"The General Theory of Displacements in Layered Soil Systems"*, III. Journal of Applied Physics, Vol. 16, pp. 296-302.

Capitão, S. (2003). *"Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade"*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Capitão, S.D. et al (2004). *"Deformabilidade, comportamento à fadiga e resistência à deformação permanente de misturas betuminosas de alto módulo para camadas de base"*. 3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Capitão, S.D. et al (2001). *"Estabelecimento de misturas betuminosas para camadas estruturalmente importantes da formulação analítica à composição final"*, Jornadas de Estradas e Pontes dos Países de Língua Portuguesa, Lisboa.

Collop, A. C. e Cebon, D. (1995). *"A Parametric Study of Factors Affecting Flexible Pavement Performance"*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 121(6), pp. 485-494

COST 333 (1999). *"Development of New Bituminous Pavement Design Method. Final Report of the Action"*. European Commission. Luxembourg.

Cunha, I.D.F. (2009). *"Planeamento e Gestão da Infra-Estrutura Viária Urbana - O Caso Da Póvoa De Varzim"*. Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Municipal. Universidade do Minho, Escola de Engenharia. Guimarães

EP-JAE. (1995). *"Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional"* (MACOPAV). EP - Estradas de Portugal.

EP-JAE. (1995a). *"Manual de Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Flexíveis"*.

Fonseca, P.M.L. (2011). *"Propriedades Volumétricas de Misturas Betuminosas (com e sem Fibras)"*. Dissertação obtenção do grau de mestre em engenharia civil - especialização em vias de comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto

Franco, F. A. C. D. P (2000). *"Um sistema para análise mecânica de pavimentos asfálticos"*. Tese para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Franco, F. A. C. D. P (2007). "*Método de dimensionamento mecânico - empírico de pavimentos asfálticos - SisPav*". Tese para Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Freitas, Elisabete F.; Pereira, Paulo A. A; (2001). "*O Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis*". Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil. ISSN 0873-1152. 11 (Maio 2001). p. 47-58. <http://hdl.handle.net/1822/2519>

Gardete, D.C., (2006). "*Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*". Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Rodoviária. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra

George, K. P. (2003). "*Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade Resilient Moduli*". Department of Civil Engineering University of Mississippi, University of Mississippi.

Highway Research Board, 1962. "*The AASHO Road Test, Special Report 73*". Publication no. 1012, Washington, D. C.

Huang, Y. H. (1993). "*Pavement Analysis and Design*". University of Kentucky, Prentice-Hall Inc, New Jersey.

Interactive, P. (2008). "*Pavement Types*". Obtido de <http://www.pavementinteractive.org/>

Jacinto, M. A. (2003). "*Caracterização Estrutural de Pavimentos*". Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2005). "*Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários*". LNEC, Portugal.

Lopes, O.M (2009). "*Misturas betuminosas – determinação das características para o cálculo dos pavimentos*". Dissertação para obtenção do grau de mestre em engenharia civil - especialização em vias de comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto

Machado, A.B. (2013). "*Contribuição para a Avaliação Estrutural de Infraestruturas Rodoviárias por Métodos Não Destrutivos*". Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa

Mendes, S.F. (2011). *"Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes"*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na área de especialização em Vias de Comunicação e Transportes. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa

Minhoto, M. J. (2005). *"Consideração da Temperatura no Comportamento à reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis"*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães.

Minhoto, M. J. C., (2009/2010). *"Apontamentos das aulas teóricas da Cadeira de Infra-estruturas de Transportes"*. Mestrado em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, ESTIG.

Minhoto, M. J. C.; Pais, J. C.; Pereira, P. A. A., (2008). *"Desenvolvimento de Modelo para Consideração da Temperatura no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos"*. In Estrada. Proceedings do V Congresso Rodoviário Português. Estoril. <http://hdl.handle.net/10198/2809>

Miranda, C. M. V. (1995). *"Manual de Dimensionamento de pavimentos rodoviários"*. JAE - Direção de Serviços Regionais do Norte, Porto.

OCDE (1991). *"Full Scale Pavement Test"*. Proceeding of Concluding Conference - Force Project, France.

Pais, J. (1999). *"Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis"*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães.

Pereira, P., & Miranda, V. (1999). *"Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários"*. Universidade do Minho. Braga

Pereira, P., & Miranda, V. (1999a). *"Gestão da Conservação de Pavimentos - Os métodos e programas de apoio à gestão dos pavimentos da rede rodoviária nacional"*. Centro Rodoviário Português (C.R.P). Lisboa

Pereira, P. A. A.; Pais, Jorge C.; Freitas, E. F.; Silva, Hugo Manuel Ribeiro Dias da Oliveira, Joel, (2007). *"A reabilitação da rede rodoviária no século XXI: a contribuição da inovação para uma visão global da reabilitação rodoviária"*. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil - ISSN 0873-1152. 28 (Jan. 2007) 19-36.

Picado Santos, L. (1995). *"Consideração da Temperatura no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis"*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Coimbra.

Picado Santos, L.; Branco, F. & Pereira, P. (2011). *“Pavimentos Rodoviários”*. Edições Almedina, 4aReimpressao, Coimbra.

Picado-Santos, L., (1994). *“Consideração da Temperatura no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis”* Volume 1, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Pinto, J.I.B.R. (2003). *“Caracterização superficial de pavimentos flexíveis”*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Vias de comunicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do porto. Porto

Previtera Filho, J. (1974). *“Efeito da temperatura na deformabilidade dos pavimentos asfálticos”*. Dissertação de M. SG., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Quaresma, L. M. T. (1985). *“Características Mecânicas de Camadas de pavimentos Rodoviários e Aeroportuários Constituídos por Materiais Granulares”*. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos, Lisboa

Ribeiro, R.M. (2012). *“Aplicação de mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta incorporação de borracha na reabilitação de pavimentos rodoviários”*. Dissertação Para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Politécnico de Viseu.

Santos, B., Cruz, A. (2009). *“Apontamentos de Caminhos-de-Ferro”* – Volume 1. ISEL. Lisboa.

Santos, C.R.G., (2011). *“Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística”*. Tese para Obtenção do Título de Doutor em Engenharia. Escola Politécnica de Universidade de São Paulo. São Paulo.

Santucci, L. (2001). *“Rut Resistant Asphalt Pavements”*. Technology Transfer Program and Pavement Specialists, Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Santucci, L. (2002). *“Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements”*. Technology Transfer Program and Pavement Specialists, Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Simões, J. A. (2008). *“Pavimentos rodoviários flexíveis: exemplo de análise económica”*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. <http://hdl.handle.net/10773/2370>

Shell International Petroleum Company, Ltd, 1978. “*Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*”. London.

Silva, H. M. R. D., (2005). “*Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique. Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas.*” Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Vias de Comunicação, Universidade do Minho – Escola de Engenharia.

Sousa, J., & Pais, J. (2002). “*Método de Dimensionamento de Reforços para Controlar a Reflexão de Fendas*”. 2º Congresso Rodoviário Português - Estradas 2002, pp.281-294.

Vale, C. M. N. A. S., (2004). “*Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Contributos para Modelação*”. Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

ANEXOS

Anexo I - Elementos recolhidos dos boletins de amostragem efetuados durante as campanhas de controlo de qualidade *in situ* durante a execução do pavimento.

Tabela I.1 – Dados referentes à percentagem de betume observado nas amostras estudadas

Amostra	Percentagem de betume [%]
56+600 D	5,00
66+200 D	5,29
69+000 D	5,00
70+500 D	5,47
70+800 D	5,47
72+500 D	5,89
56+700 E	5,30
61+800 E	5,20
66+000 E	5,50
72+700 E	5,40
73+000 E	5,53
75+000 E	4,00

Tabela I.2 – Dados referentes à percentagem de *filler* observado nas amostras estudadas

Amostra	Percentagem de <i>filler</i> [%]
56+600 D	6,30
66+200 D	6,40
69+000 D	6,10
70+500 D	5,88
70+800 D	6,30
72+500 D	4,60
56+700 E	5,40
61+800 E	5,60
66+000 E	4,90
72+700 E	3,50
73+000 E	5,70
75+000 E	5,20

Tabela I.3 – Dados referentes ao grau de compactação observado nas amostras estudadas

Amostra	Grau de compactação [%]
56+600 D	99,40
66+200 D	98,71
69+000 D	98,10
70+500 D	95,65
70+800 D	95,45
72+500 D	98,06
56+700 E	97,50
61+800 E	99,05
66+000 E	96,98
72+700 E	97,28
73+000 E	96,77
75+000 E	97,35

Tabela I.4 – Dados referentes à espessura da camada observada nas amostras estudadas

Amostra	Espessura da camada (h_{camada}) [cm]
56+600 D	7,0
66+200 D	14,5
69+000 D	9,0
70+500 D	7,0
70+800 D	4,9
72+500 D	4,9
56+700 E	6,3
61+800 E	8,0
66+000 E	5,5
72+700 E	11,2
73+000 E	9,0
75+000 E	9,0

Anexo II – Notas de cálculo geradas pelo programa JPav 1.1, desenvolvido pelo Prof. Jorge C. Pais, para cada “simulação” das amostras em estudo

i. Exemplo de introdução de dados no programa JPav 1.1

JPav 1.1
 Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão
 Universidade do Minho, Escola de Engenharia

Título do Problema: Km56+600_FaixaDir_Reg_Simulação 01

Definição da Carga

Número de Cargas: 2
 Amplitude (kN): 32,5 (20 kN, 32,5 kN, 40 kN, 65 kN)
 Raio (m): 0,125 (0,105 m, 0,125 m)
 Distância (gap) (m): 0,125 (0,105 m, 0,125 m)

Constituição do Pavimento:

Camada	Espessura (m)	Rigidez (MPa)	Coeffic. Poisson
1	0,06	4600	0,4
2	0,07	4441	0,4
3	0,09	110	0,35
4		100	0,45
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Profundidade de cálculo

Topo	Base
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Posições de cálculo

X: 0, 0,1875, X=0, X=0,3x
 Y: 0, Y=0, Y=0,3x

Buttons: Abrir Fich. Dados, Gravar dados, Calcular, Ver Resultados, Sair

ii. Entrada de dados a título de exemplo ao Km 56+600 para a simulação 01

MÓDULO COEF.
 CAMADA ELÁSTICO POISSON ESPESSURA
 (MPa) (m)

1	4600	0,4	0,060
2	4441	0,4	0,070
3	110	0,35	0,090
4	100	0,45	SEMI-INFINITE

DUAS CARGAS, CADA UMA COM:

CARGA TOTAL..... 32,5 kN
 TENSÃO DA CARGA..... 0,66 MPa
 RAIO DA CARGA..... 0,125 m

LOCALIZAÇÃO
 CARGA X Y

1	0,188	0,000
2	-0,188	0,000

iii. Resumo dos resultados obtidos das Extensões para cada amostra estudada

Amostra (Km)	Extensões	Simulação 1 Δ % betume	Simulação 2 Δ % <i>filler</i>	Simulação 3 Δ % porosidade	Simulação 4 Δ % esp. camada
56+600 D	ϵt	2,872E-04	2,852E-04	2,922E-04	1,736E-04
	ϵdp	6,141E-04	6,119E-04	6,194E-04	3,557E-04
66+200 D	ϵt	2,901E-04	2,873E-04	3,026E-04	2,595E-04
	ϵdp	6,172E-04	6,142E-04	6,306E-04	5,366E-04
69+000 D	ϵt	2,872E-04	2,866E-04	3,089E-04	3,089E-04
	ϵdp	6,141E-04	6,134E-04	6,373E-04	6,373E-04
70+500 D	ϵt	2,917E-04	2,925E-04	3,473E-04	4,101E-04
	ϵdp	6,189E-04	6,198E-04	6,723E-04	8,136E-04
70+800 D	ϵt	2,917E-04	2,896E-04	3,464E-04	4,091E-04
	ϵdp	6,189E-04	6,167E-04	6,764E-04	8,126E-04
72+500 D	ϵt	2,953E-04	3,051E-04	3,297E-04	3,486E-04
	ϵdp	6,228E-04	6,333E-04	6,592E-04	6,979E-04
56+700 E	ϵt	2,901E-04	2,942E-04	3,249E-04	3,005E-04
	ϵdp	6,172E-04	6,216E-04	6,542E-04	6,040E-04
61+800 E	ϵt	2,880E-04	2,920E-04	3,012E-04	3,379E-04
	ϵdp	6,150E-04	6,193E-04	6,235E-04	7,187E-04
66+000 E	ϵt	2,920E-04	2,996E-04	3,376E-04	2,509E-04
	ϵdp	6,192E-04	6,274E-04	6,674E-04	4,892E-04
72+700 E	ϵt	2,912E-04	3,088E-04	3,435E-04	2,960E-04
	ϵdp	6,184E-04	6,372E-04	6,734E-04	5,780E-04
73+000 E	ϵt	2,923E-04	2,943E-04	3,346E-04	2,880E-04
	ϵdp	6,195E-04	6,217E-04	6,643E-04	5,692E-04
75+000 E	ϵt	2,759E-04	2,812E-04	3,117E-04	3,410E-04
	ϵdp	6,018E-04	6,076E-04	6,402E-04	7,024E-04

Anexo III – Representação gráfica do efeito independente provocada pela introdução isolada dos fatores analisados nas amostras em estudo

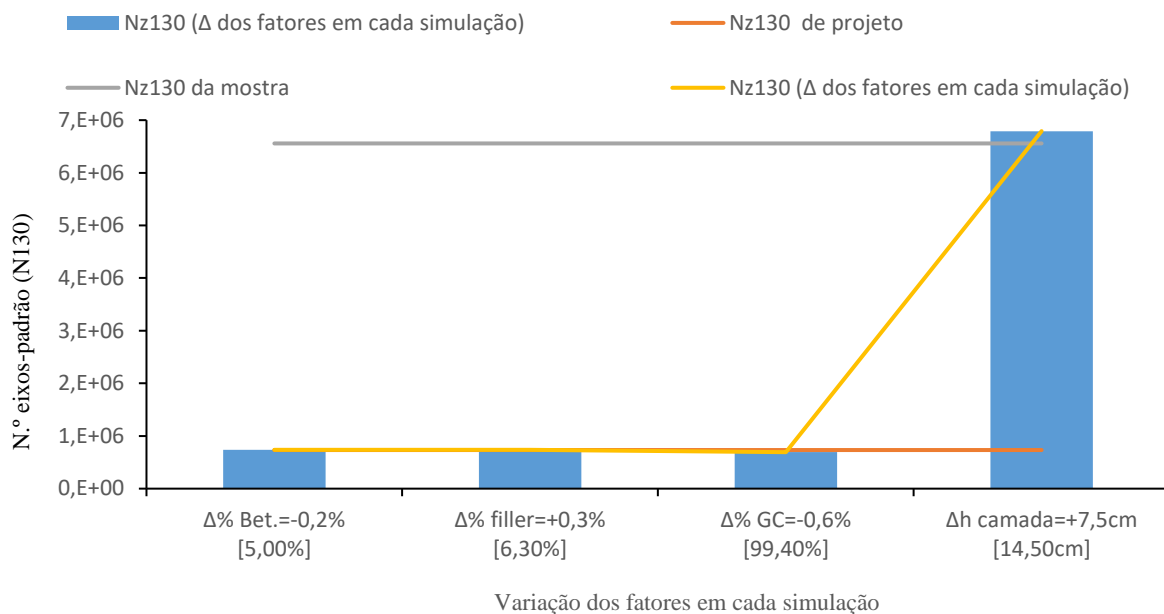


Figura III.1 – Variação do N₁₃₀ em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 56+600 (faixa da direita)

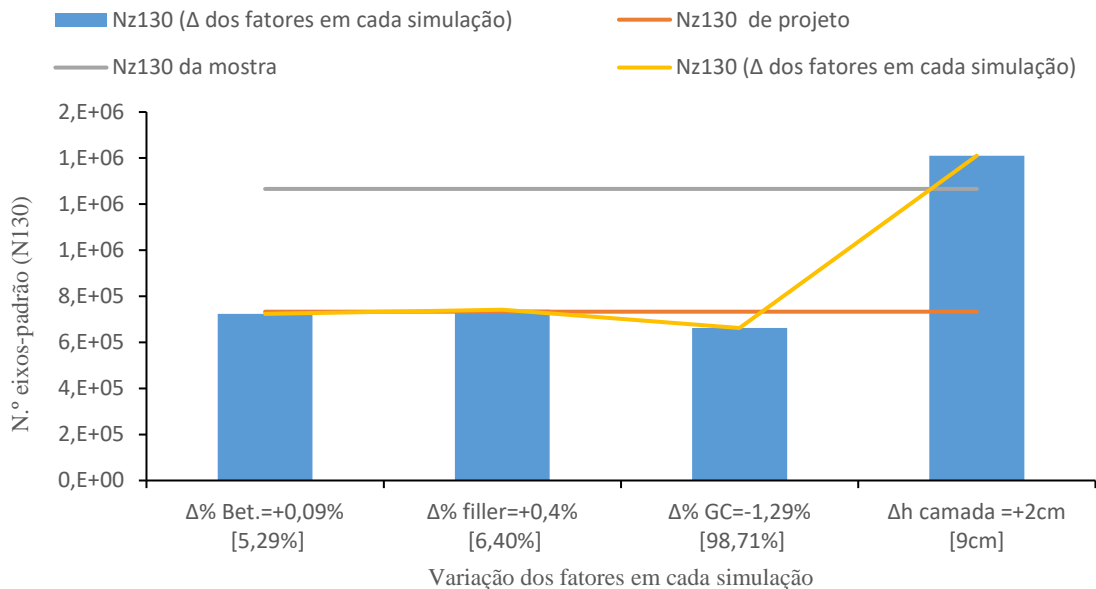


Figura III.2 – Variação do N₁₃₀ em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 66+200 (faixa da direita)

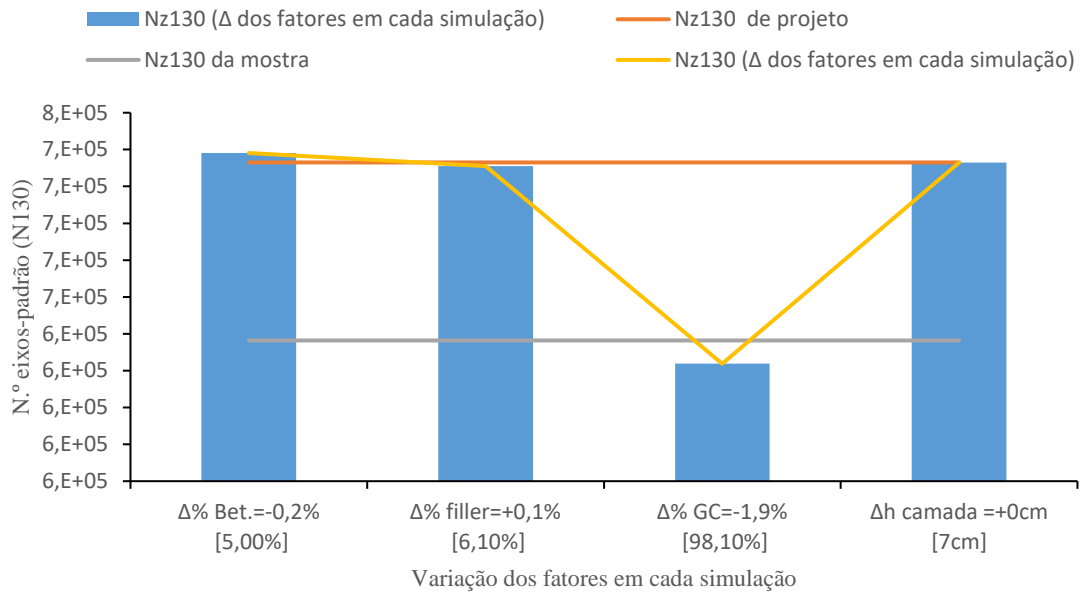


Figura III.3 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 69+000 (faixa da direita)

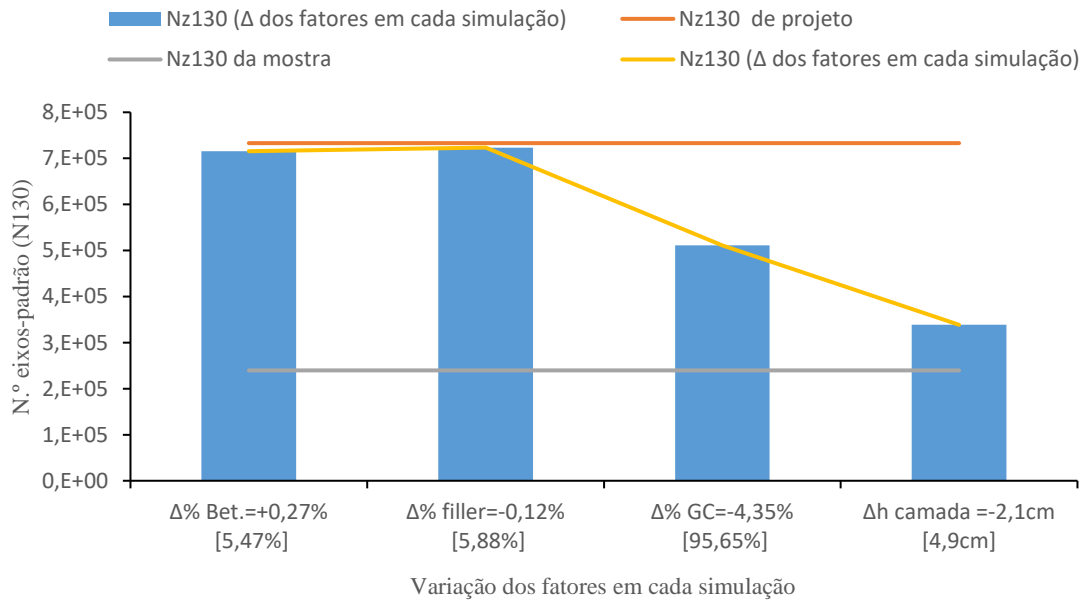


Figura III.4 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 70+500 (faixa da direita)

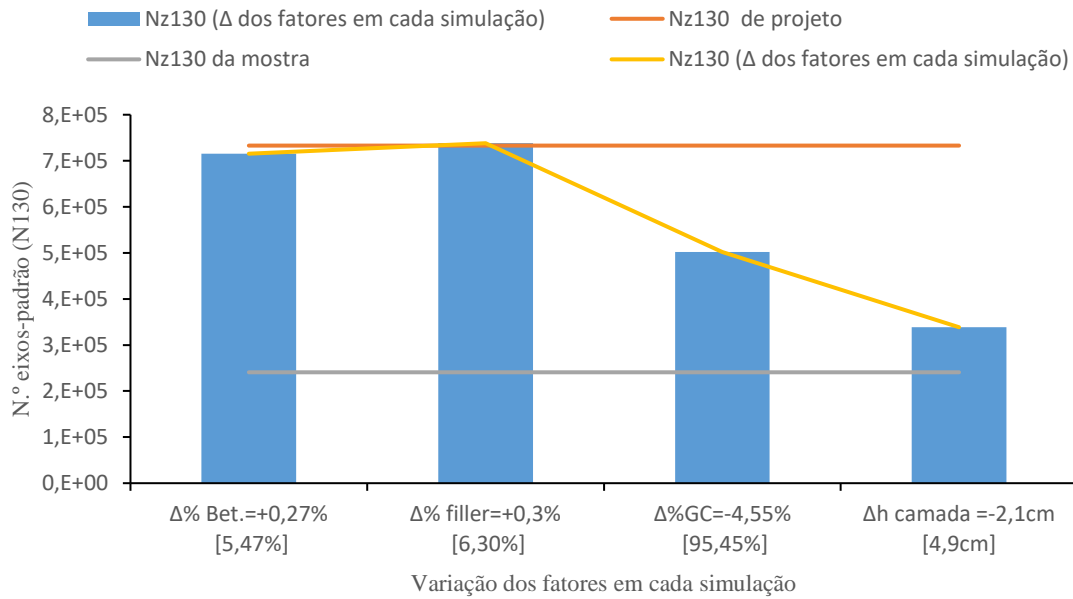


Figura III.5 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 70+800 (faixa da direita)

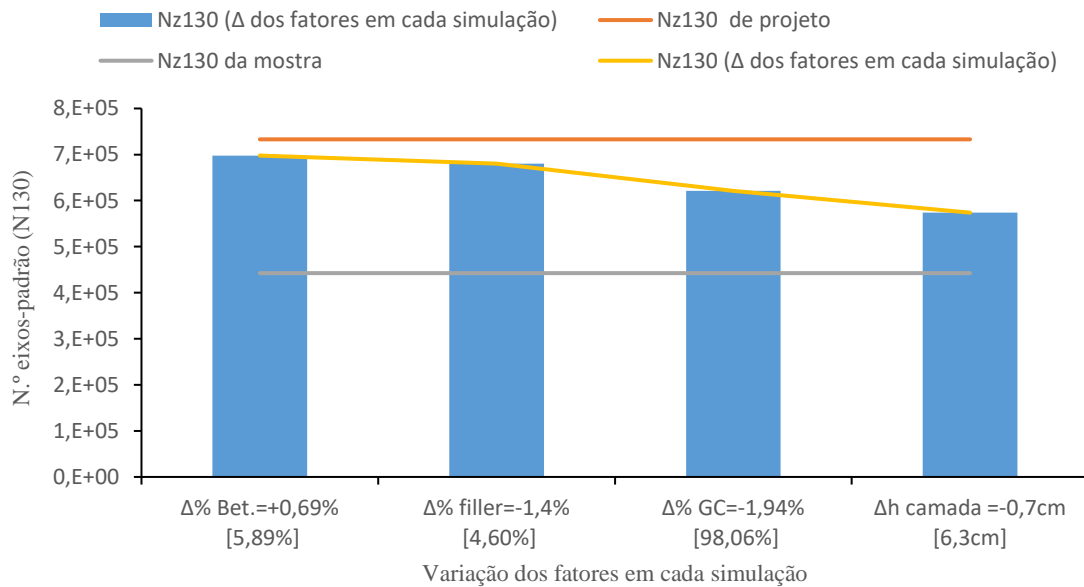


Figura III.6 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 72+500 (faixa da direita)

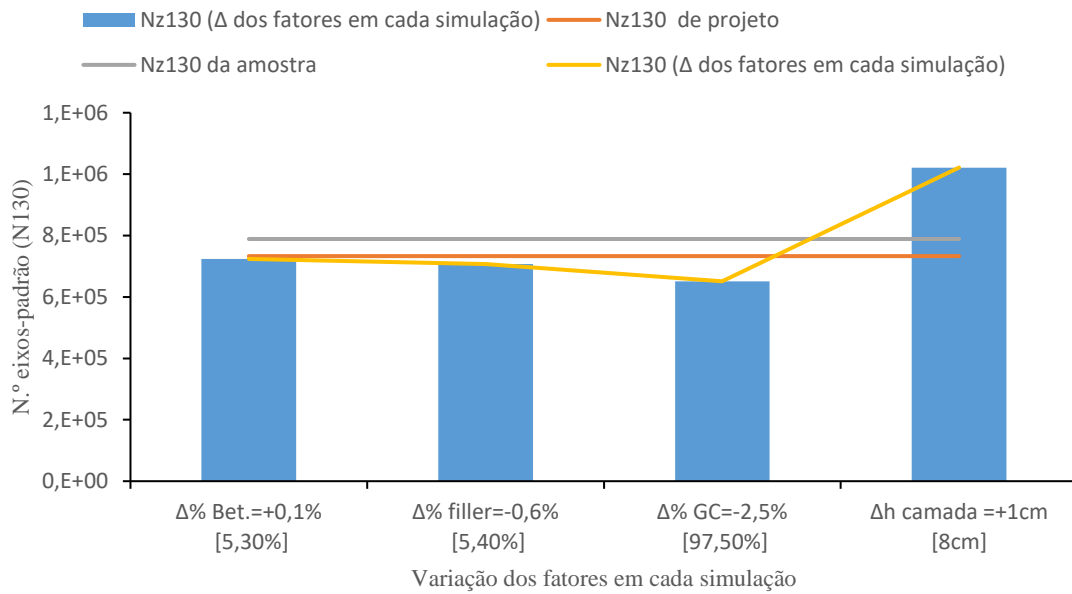


Figura III.7 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 56+700 (faixa da esquerda)

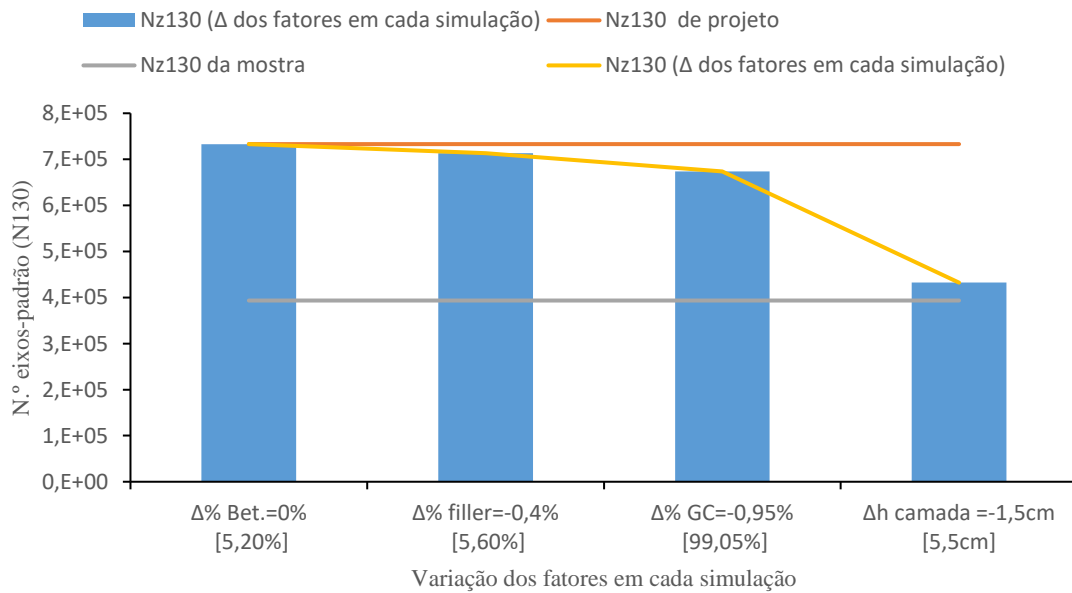


Figura III.8 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 61+800 (faixa da esquerda)

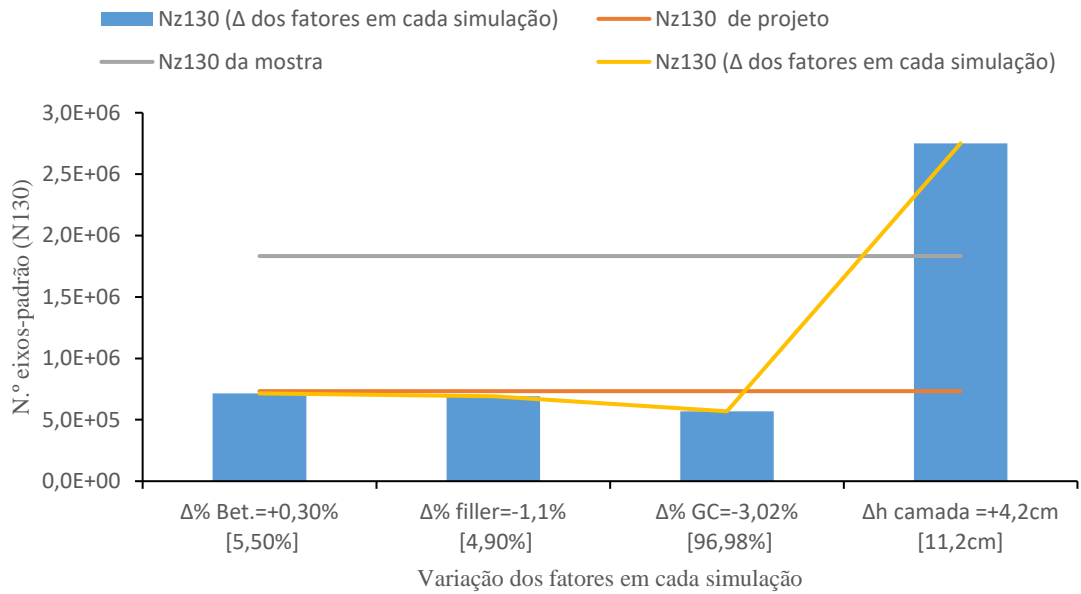


Figura III.9 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 66+600 (faixa da esquerda)

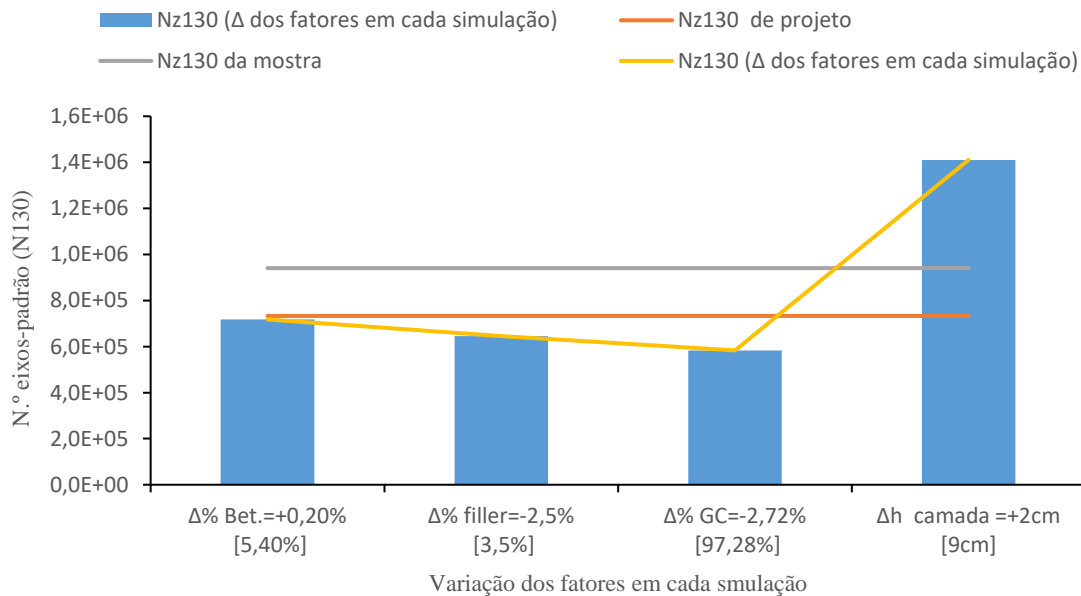


Figura III.10 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 72+700 (faixa da esquerda)

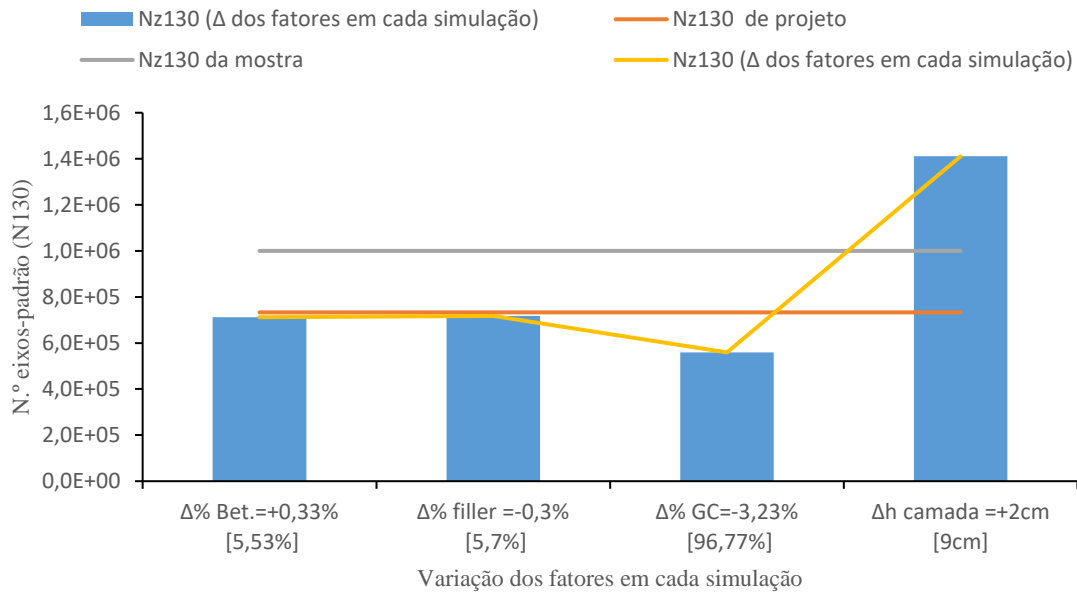


Figura III.11 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 73+000 (faixa da esquerda)

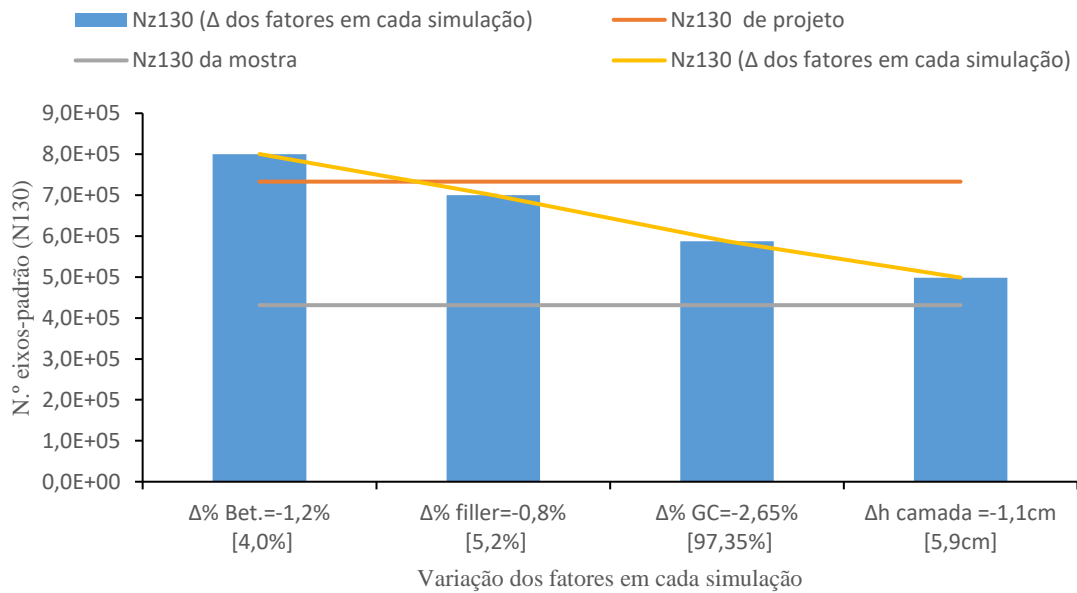


Figura III.12 – Variação do N130 em função da variação isolada dos fatores observados na amostra Km 73+000 (faixa da esquerda)