

APLICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

MANUEL ALEXANDRE VALENTIM DO MONTE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professora Doutora Cecília Maria Nogueira Alvarenga Santos do
Vale

JUNHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família, pela paciência e aos meus amigos por estarem sempre presentes!

A força da corrente está no elo mais fraco

(provérbio português)

AGRADECIMENTOS

Quero antes de mais, agradecer á empresa MonteAdriano Engenharia e Construção, S.A. pela oportunidade concedida. Agradeço ao Engº Francisco Brandão pela disponibilidade para me receber e aos Engenheiros Carlos Cardoso, José Miguel Silva e Tiago Miranda pela partilha de conhecimento diária e constante.

Agradeço também a todos os Professores da secção de Vias de Comunicação, em especial ao Professor António Fidalgo Couto pelo entusiasmo que partilhou comigo para a participação no projeto Erasmus-estagios (que não se veio a realizar) e à Professora Doutora Cecília dos Santos Vale pela dedicação com que me acompanhou e guiou neste projeto.

Não posso esquecer os meus colegas da FEUP, o Péricles, o Evaldino e o Adélio e o Jorge.

Uma palavra também para os amigos de Coimbra, os que deixei e os que me deixaram.

À Cláudia pelo apoio e inspiração!

RESUMO

Os pavimentos flexíveis são os mais representativos da rede nacional rodoviária. A constante procura por soluções que melhorem a capacidade dos pavimentos e que não descurem o aspeto económico e ambiental leva à permanente busca de novas soluções de pavimentação. Nesse contexto, surge o solo-cimento, apesar de não ser um material recente, como o comprovam estudos realizados na década de 50 e 60 do século passado pelo Eng^o Pimentel dos Santos (Santos, 1951 e 1967), não é ainda um material de uso corrente em Portugal, ao contrário do que acontece em Espanha e França, por exemplo.

Pretende este trabalho analisar detalhadamente a aplicação do solo-cimento como material de pavimentação. Serão descritas as normas e especificações em vigor no nosso país, em Espanha e França, visto serem estes os países europeus com mais estudos nesta área, e destacadas as potencialidades e limitações do seu uso.

Nesta tese aborda-se também o tipo de pavimento flexível preconizado no MACOPAV, que inclui o solo-cimento como camada estrutural e a metodologia proposta por este manual português, nomeadamente a influência das misturas betuminosas e da mistura de solo-cimento no comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis.

De seguida, será explorado um caso concreto, a subconcessão do Pinhal Interior: IC3 – Lanço Tomar/Avelar Sul, onde o autor acompanhou o processo construtivo da camada de solo-cimento. Foram também analisados e comparados dois tipos de estruturas previstas para a obra, estrutura flexível inicial e estrutura flexível com solo-cimento sob os pontos de vista estrutural e económico.

É intenção do autor que este trabalho contribua para uma utilização mais corrente do solo-cimento como material de pavimentação em pavimentos rodoviários flexíveis e que as vantagens da utilização deste material fiquem evidenciadas.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cimento, pavimentos flexíveis, dano, método construtivo.

ABSTRACT

In Portugal the flexible pavements are the most representative of the national road network. The constant search for solutions that enhance the capacity of floors and do not neglect the economic and environmental aspects, leads to the permanent search for new solutions paving. In this context, there is the soil-cement, although not a recent material, as showed by studies in the 50s and 60s of last century by Engineer Pimentel dos Santos (Santos, 1951 and 1967), it is still a material not currently used in Portugal, unlike what happens in Spain and France, for example.

This work intends to analyze in detail the application of soil-cement as paving material. We will describe the standards and specifications in use in our country, Spain and France, since they are the European countries with more research in this area and highlight the potential and limitations of its use.

This thesis also discusses the type of flexible pavement in MACOPAV recommended, which includes the soil-cement as a structural layer and methodology proposed by this Portuguese manual, including the influence of asphalt and cement-soil mixture in the structural behaviour of flexible road pavements.

Then, a case will be explored, the Pinhal Interior: IC3 – Lanço Tomar/Avelar Sul, where the author has followed the construction process of the layer of soil cement. Were also analyzed and compared two types of structures provided for the work, flexible start and flexible structure with soil-cement in the views of structural and economic.

It is the intention of the author that this work will contribute to a more current use of soil-cement as a paving material in flexible road pavements and that the advantages of using this material become evident.

KEYWORDS: soil-cement, flexible pavements, damage, construction method.

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|-----|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | v |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA | 1 |
| 1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS | 3 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 3 |
| | |
| 2. SOLO-CIMENTO COMO MATERIAL DE PAVIMENTAÇÃO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS | 7 |
| 2.1. ESPECIFICAÇÕES E NORMAS PARA SOLO-CIMENTO | 7 |
| 2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO-CIMENTO..... | 12 |
| 2.3. POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO USO DO SOLO-CIMENTO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS ... | 13 |
| 2.4. CONCEÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM SOLO-CIMENTO | 14 |
| 2.4.1. METODOLOGIA EMPÍRICO-MECANICISTA PARA DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS | 14 |
| 2.4.2. MANUAIS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO | 17 |
| | |
| 3. INFLUÊNCIA DO SOLO-CIMENTO NA RESPOSTA ESTRUTURAL E NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS | 25 |
| 3.1. DESCRIÇÃO DA MODELAÇÃO | 25 |
| 3.1.1. MÉTODO DE CÁLCULO | 25 |
| 3.1.2. MODELO ESTRUTURAL..... | 26 |
| 3.1.3. MODELO MATERIAL | 26 |
| 3.1.4. MODELO DE CARREGAMENTO | 27 |
| 3.2. ANÁLISE ESTRUTURAL DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS INDICADAS NO MACOPAV | 27 |
| 3.3. INFLUÊNCIA DA CAMADA BETUMINOSA NA RESPOSTA ESTRUTURAL E NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS | 31 |
| 3.3.1. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS CAMADAS BETUMINOSAS..... | 31 |
| 3.3.2. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS CAMADAS BETUMINOSAS | 35 |

| | |
|--|----|
| 3.4. INFLUÊNCIA DA CAMA DE SOLO-CIMENTO NA RESPOSTA ESTRUTURAL E NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS | 39 |
| 3.4.1. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CAMADA DE SOLO-CIMENTO | 39 |
| 3.4.2. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA CAMADA DE SOLO-CIMENTO..... | 42 |
| | |
| 4. CASO DE ESTUDO: “SUBCONCESSÃO DO PINHAL INTERIOR – IC3 – LANÇO TOMAR/AVELAR SUL” | 47 |
| 4.1. DESCRIÇÃO GERAL DO PROJETO | 47 |
| 4.1.1. HIPÓTESES DE DIMENSIONAMENTO | 49 |
| 4.2. ESTRUTURA DO PAVIMENTO (ESTRUTURA FLEXÍVEL INICIAL VS. ESTRUTURA FLEXÍVEL COM SOLO-CIMENTO)..... | 52 |
| 4.3. ANÁLISE ESTRUTURAL (ESTRUTURA FLEXÍVEL INICIAL VS. ESTRUTURA FLEXÍVEL COM SOLO-CIMENTO)..... | 54 |
| 4.4. ESTRUTURA OTIMIZADA..... | 57 |
| 4.5. MÉTODOS CONSTRUTIVOS | 60 |
| 4.6. ANÁLISE ECONÓMICA | 78 |
| 4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 80 |
| | |
| 5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA | 83 |
| 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 83 |
| 5.2. CONCLUSÕES..... | 83 |
| 5.3. PERSPETIVAS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA..... | 84 |
| | |
| 6. BIBLIOGRAFIA | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Pavimento flexível | 2 |
| Figura 2 - Forma de armazenamento dos provetes | 6 |
| Figura 3 - Ensaio de azul de metileno | 7 |
| Figura 4 - Pormenor do ensaio de azul de metileno | 7 |
| Figura 5 - Ensaio de compressão diametral..... | 7 |
| Figura 6 - Proвете após ensaio de compressão diametral..... | 7 |
| Figura 7 - Ensaio de compressão simples | 7 |
| Figura 8 - Proвете após ensaio de compressão simples | 7 |
| Figura 9 - Eixo Padrão..... | 13 |
| Figura 10 - Estrutura de pavimento flexível com solo-cimento (cm), MACOPAV (JAE, 1995)..... | 17 |
| Figura 11 - Estrutura de pavimento flexível 1, MACOPAV (JAE, 1995) | 23 |
| Figura 12 - Estrutura de pavimento flexível 2, MACOPAV (JAE, 1995) | 24 |
| Figura 13 - Estrutura de pavimento flexível 3, MACOPAV (JAE, 1995) | 24 |
| Figura 14 - Parâmetros em análise | 24 |
| Figura 15 – Evolução do <i>Nadm</i> em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério de fadiga da camada betuminosa | 29 |
| Figura 16 – Evolução do <i>Nadm</i> em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério de fadiga da camada de solo-cimento..... | 30 |
| Figura 17 – Evolução do <i>Nadm</i> em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério da deformação permanente | 30 |
| Figura 18 - Evolução do <i>Nadm</i> em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação descolada | 31 |
| Figura 19 - Evolução do <i>Nadm</i> em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada | 31 |
| Figura 20 - Evolução do <i>Nadm</i> em função do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, segundo o critério de fadiga da camada betuminosa (<i>emb</i> = 12 cm)..... | 33 |
| Figura 21 - Evolução do <i>Nadm</i> em função do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, segundo o critério de fadiga da camada de solo-cimento..... | 33 |
| Figura 22 - Evolução do <i>Nadm</i> em função do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, segundo o critério de deformação permanente..... | 34 |
| Figura 23 - Evolução do <i>Nadm</i> em função do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação descolada.. | 34 |
| Figura 24 - Evolução do <i>Nadm</i> em função do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada | 34 |
| Figura 25 – Evolução do <i>Nadm</i> em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de fadiga da camada betuminosa..... | 36 |
| Figura 26 - Evolução do <i>Nadm</i> em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de fadiga da camada de solo-cimento..... | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 27 - Evolução do Nadm em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente..... | 37 |
| Figura 28 - Evolução do Nadm em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação descolada | 38 |
| Figura 29 - Evolução do Nadm em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada | 38 |
| Figura 30 - Evolução do Nadm em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento, segundo o critério de fadiga da camada betuminosa..... | 40 |
| Figura 33 - Evolução do Nadm em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento segundo o critério de deformação permanente..... | 40 |
| Figura 34 - Evolução do Nadm em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada | 41 |
| Figura 35 - Evolução do Nadm em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada | 41 |
| Figura 36 - Mapa de Enquadramento da Obra | 44 |
| Figura 37 - Perfil Transversal Tipo | 44 |
| Figura 38 - Variação da Resistência à Compressão com a percentagem de cimento, aos 7, 28 e 90 dias | 48 |
| Figura 39 - Variação da Resistência à Tração Indireta com a percentagem de cimento, aos 7, 28 e 90 dias | 48 |
| Figura 40 - Estrutura flexível inicial | 49 |
| Figura 41 - Estrutura flexível com leito do pavimento em solo-cimento..... | 49 |
| Figura 42 - Designação das misturas betuminosas | 50 |
| Figura 43- Estrutura otimizada | 53 |
| Figura 44 - Execução de dreno longitudinal..... | 57 |
| Figura 45 - Canal técnico e dreno longitudinal..... | 57 |
| Figura 46 - Levantamento topográfico..... | 58 |
| Figura 47 - Perspetiva geral da zona do solo selecionado | 58 |
| Figura 48 - Pormenor da zona de escavação | 58 |
| Figura 49 - Pormenor do transporte do solo..... | 59 |
| Figura 50 - Pormenor do espalhamento do solo | 59 |
| Figura 51 - Verificação da cota da camada..... | 59 |
| Figura 52 - Estaca com cota de projeto..... | 60 |
| Figura 53 - Passagem de cilindro de rolos | 60 |
| Figura 54 - Rega com água..... | 60 |
| Figura 55 - Acompanhamento topográfico | 61 |
| Figura 56 - Espalhamento do cimento..... | 61 |
| Figura 57 - Pormenor do doseador do cimento..... | 62 |
| Figura 58 - Controlo da percentagem de cimento | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 59 - Mistura do cimento com solo | 63 |
| Figura 60 – Equipamento de mistura do cimento..... | 63 |
| Figura 61 - Pormenor do rotor da recicladora | 63 |
| Figura 62 - Aspeto do solo após a mistura com o cimento | 64 |
| Figura 63 - Compactação ligeira da camada de solo-cimento..... | 64 |
| Figura 64 - Passagem de cilindro de rolos compactador..... | 65 |
| Figura 65 - Passagem de cilindro logo após a fresa | 65 |
| Figura 66 - Nivelamento da camada de solo-cimento..... | 65 |
| Figura 67 – Equipamentos para execução da camada de solo-cimento | 66 |
| Figura 68 - Fases de execução da camada de solo-cimento..... | 66 |
| Figura 69 - Rega do solo | 66 |
| Figura 70 - Tratamento de cura na camada de solo-cimento | 67 |
| Figura 71 - Aspeto final da camada após tratamento de cura | 67 |
| Figura 72 - Aplicação da camada de base em ABGE..... | 68 |
| Figura 73 - Camada de base, camada de solo-cimento | 68 |
| Figura 74 - Camada de base a ser varrida..... | 69 |
| Figura 75 - Diferença antes/depois da camada ser varrida | 69 |
| Figura 76 - Aspeto da camada de base após rega de impregnação | 69 |
| Figura 77 - Execução de valetas | 70 |
| Figura 78 - Execução da camada de ligação em macadame betuminoso | 70 |
| Figura 79 - Pormenor da passagem inicial do cilindro de pneus | 71 |
| Figura 80 - Compactação da camada betuminosa | 71 |
| Figura 81 - Junta transversal..... | 71 |
| Figura 82 - Aspeto da camada de macadame betuminoso..... | 72 |
| Figura 83 - Execução do separador central | 72 |
| Figura 84 - Execução de separador central | 72 |
| Figura 85 - Execução de caleira de rasgo contínuo..... | 73 |
| Figura 86 - Pormenor da execução da caleira de rasgo contínuo | 73 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - 95% Proctor Normal e para o <i>W_{natural}</i> , EP (2009) | 8 |
| Tabela 2 - Tipos de solos a usar em Leito do Pavimento (classificação ASTM D 2487 - 85) | 9 |
| Tabela 3 - Modelos e <i>softwares</i> para dimensionamento de pavimentos | 15 |
| Tabela 4 - Fatores de Agressividade para o eixo padrão de 130 kN | 16 |
| Tabela 5 - Classes de solos a serem tratados com cimento..... | 16 |
| Tabela 6 - Características dos materiais e classe de plataformas, MACOPAV (JAE, 1995) | 17 |
| Tabela 7 - Módulo de deformabilidade no segundo ciclo de carga, DGC..... | 18 |
| Tabela 8 - Categorias de Tráfego Pesado, DGC | 18 |
| Tabela 9 - Estruturas para Tráfego Pesado segundo o procedimento espanhol (adaptado do DGC, 2010)..... | 19 |
| Tabela 10 - Capacidade de Suporte da Plataforma (MPa), LCPC (1994) | 20 |
| Tabela 11 - Espessura do Leito do Pavimento em material tratado (LCPC,1994) | 20 |
| Tabela 12 - Características dos Materiais de Pavimento, MACOPAV (JAE, 1995)..... | 22 |
| Tabela 13 - Análise estrutural, estruturas flexíveis 1, 2 e 3 do MACOPAV | 26 |
| Tabela 15 - <i>N_{adm}</i> em função da espessura da camada betuminosa: interface entre solo-cimento e fundação descolada..... | 28 |
| Tabela 16 - <i>N_{adm}</i> em função da espessura da camada betuminosa: interface entre solo-cimento e fundação colada | 28 |
| Tabela 17 - <i>N_{adm}</i> em função do módulo de deformabilidade da camada betuminosa: interface entre solo-cimento e fundação descolada | 32 |
| Tabela 18 - <i>N_{adm}</i> em função do módulo de deformabilidade da camada betuminosa: interface entre solo-cimento e fundação colada..... | 32 |
| Tabela 19 - <i>N_{adm}</i> em função da espessura da camada de solo-cimento: interface entre solo-cimento e fundação descolada..... | 35 |
| Tabela 20 - <i>N_{adm}</i> em função da espessura da camada de solo-cimento: interface entre solo-cimento e fundação colada | 36 |
| Tabela 21 - <i>N_{adm}</i> em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento: interface entre solo-cimento e fundação descolada | 38 |
| Tabela 22 - <i>N_{adm}</i> em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento: interface entre solo-cimento e fundação colada..... | 39 |
| Tabela 23 - Numero acumulado de Eixos Padrão | 45 |
| Tabela 24 - Características Geológicas do terreno de Fundação..... | 46 |
| Tabela 25 - Características do solo a tratar com cimento | 46 |
| Tabela 26 - Resistência Média dos provetes de solo-cimento, ensaios de laboratório | 47 |
| Tabela 27 – Estruturas do pavimento em Plena Via | 49 |
| Tabela 28 - Análise das estruturas flexíveis inicial (sem solo-cimento) e com solo-cimento | 51 |
| Tabela 29 – Comparativo entre estrutura inicial e estrutura com solo-cimento | 52 |
| Tabela 30 - Diferença Alize/Bisar | 52 |

| | |
|--|----|
| Tabela 31 - Avaliação do dano | 53 |
| Tabela 32 - Estudo da estrutura otimizada..... | 54 |
| Tabela 33 - Avaliação do dano da estrutura otimizada | 56 |
| Tabela 34 - Estudo económico | 75 |

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

E_b - módulo de deformabilidade da camada de base [MPa];

E_f - módulo de deformabilidade da fundação [MPa];

E_{mist} - módulo de deformabilidade da mistura betuminosa [MPa];

E_{sb} - módulo de deformabilidade da camada de sub-base [MPa];

N_{adm} - número de eixos padrão admissível;

N_{real} - número de eixos padrão que solicitam o pavimento;

R_{c60} - Resistência à compressão aos 60 dias (cura normal) [MPa];

R_{ci} - Resistência à compressão aos 60 dias (28 dias de cura normal mais 32 dias de imersão em água) [MPa];

R_t - resistência à tração por flexão do solo-cimento [MPa];

T_{AB} - temperatura anel e bola;

V_A - valor de azul-de-metileno obtido pelo método da mancha no material de dimensão inferior a 75 μm ;

W_{opm} - teor em água ótimo referido ao Ensaio Proctor Modificado;

W_{opn} - teor em água ótimo referido ao ensaio Proctor Normal;

v_a - percentagem volumétrica de agregado;

v_b - percentagem volumétrica de betume;

ε_{dp} - extensão de compressão no topo do solo de fundação;

ε_t - extensão de tração na base das camadas betuminosas;

ε_{xx} - extensão radial de tração;

ε_{zz} - extensão vertical de compressão;

σ_{Sc} - tensão na base da camada de solo-cimento [MPa];

σ_{xx} - tensão radial de tração [kPa]

a - constante dependente da composição e propriedades da mistura de solo-cimento;

AR - parte superior do aterro;

b - constante dependente da composição e propriedades da mistura de solo-cimento;

BD - betão betuminoso em camada de desgaste;

DEC - Departamento de Engenharia Civil

DGC - Dirección General de Carreteras;

emb - espessura das camadas betuminosas [cm];

EP - Estradas de Portugal;

esc - espessura da camada de solo-cimento [cm];

Esc - módulo de deformabilidade da mistura de solo-cimento [MPa];

LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

MB – macadame betuminoso em camada de base/regularização;

MBD – mistura betuminosa densa em camada de regularização;

N – Número acumulado de passagens do eixo padrão;

pen25 – penetração a 25°C;

PST – parte superior do terrapleno;

Sc – solo-cimento;

VMA – volume de vazios na mistura de agregados;

Z – profundidade [cm];

v – coeficiente de Poisson;

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

Os pavimentos rodoviários são habitualmente classificados numa de três categorias: flexíveis, semi-rígidos e rígidos, consoante as características estruturais. Esta tese irá debruçar-se, exclusivamente sobre os pavimentos flexíveis fazendo uma análise detalhada quanto à aplicação do solo-cimento como material de pavimentação. Apesar de este tipo de pavimentos ser o predominante na rede rodoviária nacional, o solo-cimento, como material de pavimentação não está ainda suficientemente estudado para uma aplicação mais generalizada. Assim, pretende-se com este trabalho dar contributos para uma utilização mais corrente do solo-cimento em pavimentos flexíveis.

O solo-cimento é um material que pode ser usado tanto em camadas do leito do pavimento como em camadas de base e sub-base. Consiste numa mistura de cimento, solo e água cujo principal objetivo é o de melhorar as características estruturais do pavimento.

Segundo Rios (2011), a diferença fundamental entre o solo-cimento e o betão é que naquele as partículas de solo não são totalmente revestidas pela pasta de cimento ao contrário do que acontece no betão dado ter um teor em cimento mais elevado e uma maior quantidade de água.

De um modo geral, pode dizer-se que os pavimentos, que apresentam solo-cimento são constituídos por uma base estabilizada com cimento Portland protegida por camadas de misturas betuminosas: estas estruturas surgiram pela necessidade de estabilização de solos a baixo custo. Note-se que o seu desenvolvimento só foi efetivo após a descoberta de determinadas propriedades fundamentais dos solos, especialmente no que diz respeito à compactação, cujo conhecimento se deve a R.Proctor.

Em Portugal, esta técnica teve grande desenvolvimento nas décadas de 50 e 60 do século passado, pela mão do Eng^o Manuel Pimental dos Santos, no Laboratório de Ensaios do Solo de Moçambique. Durante estas décadas foram construídos milhares de quilómetros de estradas com base em solo-cimento, em Moçambique e Angola e vários estudos foram publicados, nomeadamente “*Curso de Solo-cimento*”(Santos, 1967), “*Progressos no projeto e construção de estradas em solo-cimento*” (Santos, 1962) e “*Ensaios normais de solo-cimento*”(Santos, 1951).

Os principais objetivos a ter em conta durante a execução de um pavimento rodoviário são a segurança, a economia e a comodidade. Assim, estes pavimentos devem apresentar características que permitam satisfazer não só requisitos de conforto ótico, acústico e de circulação como também a integridade estrutural do pavimento, de modo a minimizar-se a necessidade de intervenções de conservação.

Neste contexto, o solo-cimento pode ter um papel de relevo, porque um dos fatores de que depende a resposta estrutural e funcional do pavimento são as características dos materiais das camadas constituintes, logo, o incremento de resistência inerente a uma camada feita em solo-cimento vem maximizar a resposta estrutural do pavimento.

O que distingue os pavimentos flexíveis dos semi-rígidos e rígidos é a sua elevada deformabilidade e materiais constituintes. Estas estruturas são constituídas por:

- misturas betuminosas nas camadas superiores;
- materiais granulares em uma ou duas camadas ou materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos (como por exemplo, o cimento).

A parte superior do pavimento, em material betuminoso, é constituída por camada de desgaste, que está diretamente em contacto com o rodado dos veículos, camada de regularização, responsável pelo nivelamento da espessura do pavimento e a camada de base, cuja função é, essencialmente, degradar os esforços induzidos pelos rodados para as camadas inferiores. As três camadas betuminosas descritas, por aplicação de “regas de colagem” são consideradas coldas, ou seja, consideram-se como se de apenas uma camada se tratasse.

Na base das camadas betuminosas, sob o ponto de aplicação de carga, é avaliada a extensão de tração (ϵ_t) para efeitos de dimensionamento.

As camadas granulares e os solos de fundação, não têm capacidade de resistir a esforços de tração, sendo responsáveis pela degradação dos esforços verticais e portanto o parâmetro determinante para o dimensionamento destes pavimentos é a extensão vertical no topo do solo de fundação (ϵ_{dp}).

A camada de solo-cimento tem como função a degradação das tensões, sendo avaliada a tensão na base desta camada (σ_{sc}) em dimensionamento.

As três grandezas referidas, assim como a constituição geral de um pavimento flexível estão exemplificadas na Figura 1:

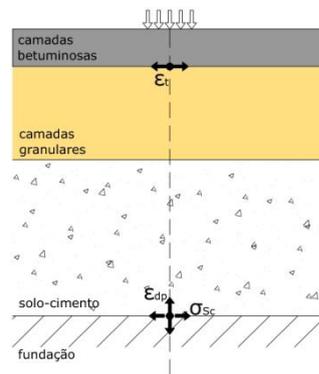


Figura 1 - Pavimento flexível

O comportamento estrutural de um pavimento flexível é altamente dependente da intensidade do tráfego pesado, das características dos materiais e do solo de fundação. Para fins de dimensionamento, a inclusão de camadas de materiais com superior capacidade de suporte conduz a uma diminuição da espessura das camadas betuminosas. Dado que estas são as mais onerosas, a inclusão de solo-cimento virá a constituir uma vantagem no que à economia diz respeito.

É de referir que, em vários países europeus, o processo de (pré)dimensionamento de um pavimento é proposto em guias de dimensionamento, baseados em modelos de cálculo e modelos estruturais simples, como a teoria multicamada e o modelo axissimétrico.

Em Portugal, o Manual de conceção de pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (de agora em diante denominado MACOPAV) da ex-Jae (atual Estradas de Portugal), prevê a utilização de três tipos de pavimentos flexíveis, sendo que o terceiro, o que inclui uma camada de solo-cimento e, por isso, será o mais estudado neste trabalho. O MACOPAV (JAE, 1995) apresenta uma organização e pressu-

postos base semelhantes ao guia de dimensionamento francês do LCPC, “*Conception et dimensionnement des structures de chaussée*” (LCPC, 1994), no qual se baseou a sua elaboração.

O MACOPAV (JAE, 1995) é um manual de pré-dimensionamento, devendo as espessuras e materiais das camadas constituintes do pavimento definido ser ajustadas, por meio de cálculo, em fase de projeto de execução. Segundo o manual, as estruturas são definidas em função da classe de tráfego, da deformabilidade da fundação de suporte ao pavimento e dos materiais de pavimentação utilizados.

Apesar do manual português adotar, no dimensionamento de pavimentos flexíveis um período de vida útil de 20 anos e ação da carga de um eixo de 80 kN, nesta tese considera-se o eixo padrão de 130 kN, por se tratar do nível de carga mais próximo do peso máximo dos eixos dos veículos pesados. Este tipo de eixos é já o habitualmente considerado em países como Espanha, França e Reino Unido. Quanto ao período de vida útil considera-se o mesmo do MACOPAV.

Há a referir que o dimensionamento rigoroso de pavimentos flexíveis, é feito por métodos mais complexos e sofisticados, que permitem determinar a resposta estrutural do pavimento com a fiabilidade que é exigido em projeto de execução.

Como síntese, refere-se que o uso do solo-cimento como material de pavimentação é, como se pretende demonstrar nesta tese, uma matéria de grande interesse visto que a sua utilização tem vantagens inquestionáveis.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

Os objetivos gerais deste trabalho são os seguintes:

- 1) identificar especificações e normas para solo-cimento;
- 2) identificar os fatores que influenciam o comportamento do solo-cimento;
- 3) identificar potencialidades e limitações do uso do solo-cimento em pavimentos flexíveis;
- 4) analisar os efeitos da consideração do solo-cimento no dimensionamento de pavimentos flexíveis;
- 5) identificar processos construtivos de pavimentos flexíveis com solo-cimento;
- 6) realizar estudo económico de um pavimento flexível com solo-cimento.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, nos quais se inclui este de “Introdução”, onde se faz um enquadramento do tema em estudo e se evidencia a relevância do âmbito em que se insere e os objetivos a atingir.

No Capítulo 2, “Solo-cimento como material de pavimentação em pavimentos flexíveis”, são introduzidas as especificações e normas para este material, os fatores que influenciam o seu comportamento mecânico, as potencialidades e limitações do seu uso e por último é descrita a metodologia empírico-mecanicista para dimensionamento de pavimentos flexíveis e apresentados os principais manuais de pré-dimensionamento europeus para pavimentos rodoviários.

No Capítulo 3, “Influência do solo-cimento na resposta estrutural e no dimensionamento de pavimentos flexíveis” é descrita a modelação dos pavimentos, são analisadas as três estruturas de pavimentos flexíveis preconizadas no MACOPAV, é estudada, em detalhe a terceira estrutura de pavimento, indicada no MACOPAV, dado ser a que considera o solo-cimento como material constituinte. Através do *software* Alize será estudada a influência da espessura e das características mecânicas da camada betuminosa e da camada de solo-cimento na resposta estrutural de pavimentos flexíveis.

O Capítulo 4, “Caso de estudo: “Subconcessão do Pinhal Interior: IC3 – Lanço Tomar/Avelar Sul”” apresenta a obra em questão, fazendo-se:

- i. uma descrição geral do projeto;
- ii. uma comparação entre a estrutura flexível inicial e a estrutura flexível com solo-cimento;
- iii. uma proposta de uma estrutura otimizada;
- iv. uma análise económica comparativa entre pavimentos flexível com e sem solo-cimento como material constituinte.

Neste capítulo, descreve-se ainda o método construtivo deste tipo de pavimentos.

Por fim, o Capítulo 5, “Conclusões e perspectivas para investigação futura” é dedicado às conclusões finais e a sugestões para eventuais trabalhos futuros.

2

Solo-cimento como material de pavimentação em pavimentos flexíveis

Neste capítulo apresentam-se as especificações e normas atuais para a aplicação de solo-cimento em pavimentos flexíveis. De seguida, faz-se uma descrição sobre os fatores que influenciam o comportamento mecânico deste material e as suas potencialidades e limitações. Por fim, é feita uma descrição dos métodos de conceção, com destaque para a metodologia empírico-mecanicista e para os manuais de pré-dimensionamento.

2.1. ESPECIFICAÇÕES E NORMAS PARA SOLO-CIMENTO

Normalmente cada país tem as suas normas, especificações e outros documentos que ajudam o projetista na escolha da melhor solução de pavimento a adotar. As Normas Portuguesas referentes têm por base padrões internacionais, especialmente normas espanholas e francesas associadas à experiência nacional. Estas normas e especificações, tal como descreve Vitali (2008), reportam-se essencialmente ao solo, ao cimento (tipo e dosagem) e à água, havendo ainda referências a materiais nocivos e a aditivos.

Ainda segundo este autor, relativamente ao solo a misturar com cimento, os parâmetros usados pelas normas baseiam-se na granulometria e limites de Atterberg, sendo a percentagem de finos, dimensões máximas, índice de plasticidade e limites de liquidez os mais referenciados. As especificações do LNEC (LNEC, 1971) recomendam as seguintes características:

- teor máximo em matéria orgânica = 2%;
- máximo teor em sulfato = 0,2%;
- diâmetro máximo das partículas (D_{max}) = 75 mm;
- percentagem de passados no peneiro ASTM n°4 (4,75 mm) $\geq 45\%$;
- percentagem de passados no peneiro ASTM 50 mm $\geq 80\%$;
- limite de liquidez (w_l) $\leq 45\%$.

As recomendações da EP – Estradas de Portugal, retiradas do Caderno de Encargos (EP, 2009) distinguem mistura realizada em central e *in situ* e são baseadas nas normas francesas. Referem ainda que o solo a ser tratado, deve estar isento de ramos, folhas, troncos, raízes, ervas, lixo ou quaisquer detritos orgânicos e deve atender às seguintes características:

- se for misturado em central:

- $D_{max} = 50 \text{ mm}$;
- Percentagem de material passado no peneiro nº200 ASTM, máxima = 35%;
- Índice de Plasticidade, máximo = 12%.
- se for misturado *in situ*:
 - $D_{max} = 100 \text{ mm}$;
 - Índice de Plasticidade, máximo = 12%.

É referida ainda a possibilidade de utilização de outro tipo de solos, se ficar provado pelo Adjudicatário que o equipamento tem capacidade de desagregação suficiente de modo a garantir uma mistura íntima e homogênea do solo com o cimento, e após aprovação da Fiscalização.

A composição da mistura de solo-cimento resultará de um estudo laboratorial específico que deverá obedecer a características de curto e longo prazo:

- **Características de curto prazo:**
 - Condições de autorização de traficabilidade: $R_c > 1,0 \text{ MPa}$;
 - Resistência á imersão em idades jovens:
 - se $V_A \leq 0,5$, $R_{ci} / R_{c60} \geq 0,80$;
 - se $V_A > 0,5$, $R_{ci} / R_{c60} \geq 0,60$

R_{ci} – Resistência à compressão aos 60 dias (28 dias de cura normal mais 32 dias de imersão em água);

R_{c60} – Resistência à compressão aos 60 dias (cura normal);

V_A – valor de azul-de-metileno obtido pelo método da mancha no material de dimensão inferior a 75 μm (NF P 18-592)

- **Características de longo prazo** (aos 28 ou 90 dias respetivamente para os cimentos do tipo I ou II):
 - Resistência à compressão diametral, mínima = 0,25 MPa;
 - Resistência à compressão simples, mínima = 2,0 MPa.

A título ilustrativo, nas figuras 2 a 8, mostram-se as principais fases dos ensaios de laboratório (azul de metileno, compressão diametral e compressão simples), assim como a forma de armazenamento dos provetes e o estado destes após os referidos ensaios.



Figura 2 - Forma de armazenamento dos provetes



Figura 3 - Ensaio de azul de metileno



Figura 4 - Pormenor do ensaio de azul de metileno



Figura 5 - Ensaio de compressão diametral



Figura 6 - Provete após ensaio de compressão diametral



Figura 7 - Ensaio de compressão simples



Figura 8 - Provete após ensaio de compressão simples

Nas condições a curto prazo, é importante, assegurar as condições de traficabilidade, através da resistência do material à imersão em água. A longo prazo o valor mínimo da resistência à tração indireta é imposto para assegurar a resistência à formação de gelo.

Em relação ao cimento, Vitali (2008) refere que qualquer tipo pode ser usado, mas o mais utilizado é o cimento Portland comum. Segundo a ATIC (ATIC, 1993), aumentar a percentagem de cimento é a

maneira mais económica de elevar a capacidade de carga em camadas de pavimento sem que seja necessário aumentar a sua espessura, evitando o emprego de material de melhor qualidade.

A especificação portuguesa E304 (LNEC, 1974) ainda válida, sugere ábacos para avaliar o teor de cimento necessário para se atingir a resistência à compressão uniaxial mínima admissível da mistura após 7 dias de cura. A EP (EP, 2009) apresenta diferentes recomendações dependendo da aplicação futura da mistura: em aterros ou em camadas selecionadas abaixo da base e sub base do pavimento. De acordo com o Caderno de Encargos Tipo da EP, a utilização de solos, no seu estado natural, exige que sejam verificadas duas condições relativas ao teor em água:

$$\text{Solos incoerentes:} \quad 0,8 \times W_{opm} \leq W_{nat} \leq 1,2 \times W_{opm} \quad (1)$$

$$\text{Solos coerentes:} \quad 0,7 \times W_{opn} \leq W_{nat} \leq 1,4 \times W_{opn} \quad (2)$$

W_{opm} – teor em água ótimo referido ao Ensaio Proctor Modificado;

W_{opn} - teor em água ótimo referido ao ensaio Proctor Normal.

Para solos tratados, aplicados em aterros, na Tabela 1, apresentam-se os valores do CBR imediato estimado de 95% do Proctor Normal e para o teor de água natural, antes e depois do tratamento, propostos pelo mesmo Caderno de Encargos da EP:

Tabela 1 - 95% Proctor Normal e para o $W_{natural}$, EP (2009)

| Tipo de Solo | CBR imediato | |
|--------------|---------------------|----------------------|
| | Antes do tratamento | Depois do tratamento |
| S0 | <3 | 5 |
| S1 | 3 a 5 | 5 a 15 |
| S2 | 5 a 8 | 7 a 20 |

Sendo que na Tabela 2 se encontra a descrição de cada tipo de solo e o valor do CBR correspondente:

Tabela 2 - Tipos de solos a usar em Leito do Pavimento (classificação ASTM D 2487 - 85)

| Classe | CBR (%) | Tipo de Solo | Descrição |
|-----------|----------|--------------|---|
| S0 | <3 | OL | Siltos orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade (1) |
| | | OH | Argilas orgânicas de plasticidade média a elevada; Siltos orgânicos (2) |
| | | CH | Argilas inorgânicas de plasticidade elevada; Argilas gordas (3) |
| | | MH | Siltos inorgânicos; Areias finas micáceas; Siltos micáceos (4) |
| S1 | ≥3 a <5 | OL | Idem (1) |
| | | OH | Idem (2) |
| | | CH | Idem (3) |
| | | MH | Idem (4) |
| S2 | ≥5 a <10 | CH | Idem (3) |
| | | MH | Idem (4) |
| | | CL | Argilas inorgânicas de plasticidade baixa a média; Argilas com seixo, argilas arenosas, argilas siltosas e argilas magras. |
| | | ML | Siltos inorgânicos e areias muito finas; Areias finas, siltosas ou argilosas; Siltos argilosos de baixa plasticidade. |
| | | SC | Areia argilosa; Areia argilosa com cascalho. (5) |

A dosagem de cimento, segundo a ATIC (ATIC, 1993) é a quantidade mínima que satisfaça as condições de resistência e durabilidade. A resistência do solo-cimento é definida pela resistência à rotura por compressão uniaxial de provetes cilíndricos com 7 dias de idade. Esta entidade refere que devem ser executados ensaios para diferentes teores e graus de compactação e sempre com o teor ótimo em água. Caso não seja possível executar a bateria de ensaios de compressão para obter o teor mínimo de cimento, a ATIC recomenda uma dosagem mínima de 1 kg/m²/cm de espessura de camada.

No que concerne à água as normas referem que a potável, da rede pública, é satisfatória para a mistura de solo-cimento e não deve possuir matéria orgânica em suspensão porque esta retarda a hidratação do cimento. Em geral, a quantidade de água a ser adicionada é determinada pela quantidade requerida para a compactação.

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO-CIMENTO

Como referido anteriormente, solo-cimento é uma mistura de material granular (natural ou britado) com água e cimento. Assim, os fatores que influenciam o comportamento mecânico do solo-cimento estão relacionados com os materiais que o constituem e as suas propriedades, destes destacam-se: o tipo de solo, características físicas e químicas, granulometria, comportamento perante a água e trabalhabilidade.

Quase todos os solos podem ser tratados, mas por razões económicas, esse tratamento pode ou não ser vantajoso se a percentagem de cimento for muito elevada, sendo o teor de cimento também um dos fatores que influenciam o comportamento mecânico do solo-cimento. Solos pertencentes à mesma série exigem normalmente a mesma percentagem de cimento para a estabilização bem sucedida com cimento.

É de referir ainda, que de um modo geral a quantidade de cimento aumenta com a percentagem de finos, sendo desaconselhável a sua utilização em argilas gordas. Segundo Matos Fernandes (2006), argilas gordas são solos argilosos de alta plasticidade, ou seja, aqueles em que os limites de liquidez e plasticidade, assim como a respectiva diferença (o índice de plasticidade) são muito elevados. Quando a cimentação ocorre nos pontos de contacto das partículas, num solo bem graduado a cimentação é mais efetiva assim como a quantidade de cimento necessária para alcançar a mesma resistência é mais baixa do que numa areia uniforme. A percentagem de cimento usada na mistura influencia a plasticidade, variações de volume, susceptibilidade à ação do gelo, propriedades elásticas e resistência à ação da água e do gelo.

Segundo Rios (2011), a operação de mistura e compactação do cimento e do solo tem também a máxima importância para a qualidade do material solo-cimento. Neste caso, depende do tipo de equipamento usado, dos processos de trabalho adotados e da sua duração, que estão intimamente ligados com o tipo de solo, grau de pulverização e teor em água.

Tal como sucede nos betões de cimento, também o solo-cimento necessita de um período de cura antes de ser posto em serviço, dependendo esse período do tipo de cimento aplicado. Normalmente este período é fixado nos 7 dias, os meios usuais de manter uma proteção adequada no período de cura consistem na aplicação de uma rega com produto betuminoso apropriado ou espalhamento de terra mantida permanentemente húmida (Rios, 2011).

O teor de humidade permite a hidratação do cimento o que facilita a compactação e a consistência da mistura de solo-cimento. Estudos realizados por Gomes Correia e Neves (1999) concluíram que uma completa hidratação do cimento é garantida com uma quantidade de cerca de 20% do peso do cimento, no entanto, é necessário ter em conta a distribuição granulométrica do solo, pois tem também importância na definição do teor de humidade.

Desde o início do uso de solo-cimento que se tentou melhorar o comportamento do mesmo ou diminuir a quantidade de cimento com recurso a aditivos. Um solo com características diferentes do existente, pode ser misturado antes da estabilização de forma a melhorar as características finais da mistura. A cal pode também ser usada, com duas finalidades: evitar ou diminuir os efeitos da matéria

orgânica ou mistura com solos altamente plástico para facilitar a pulverização e mistura do solo-cimento

Por fim, a porosidade da mistura. Esta análise deve ser feita com a compactação efetuada antes do início da cura do cimento para que este procedimento não rompa as ligações do agente cimentante. Estudos realizados por Consoli *et al.* (2007) verificaram que a diminuição da porosidade da mistura compactada aumenta exponencialmente a resistência à compressão devido ao aumento dos pontos de contacto entre as partículas.

2.3 POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO USO DE SOLO-CIMENTO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Nesta secção serão enumeradas as potencialidades e limitações do solo-cimento em detrimento das soluções tradicionais e habitualmente usadas na construção de pavimentos rodoviários flexíveis.

As vantagens da opção pelo solo-cimento são essencialmente de nível económico, ambiental e estrutural.

O solo-cimento, por se tratar da mistura de um material granular com um ligante hidráulico, é um material de pavimentação que visa incrementar a capacidade resistente da estrutura do pavimento.

Em obras rodoviárias, o aumento da capacidade resistente da estrutura do pavimento conduz a um aumento do número de eixos padrão admissível. Ao combinar os dois materiais, solo e cimento, o incremento de resistência possibilita a diminuição da espessura das camadas, o que resulta na diminuição da espessura total da estrutura.

Com a diminuição da espessura total da estrutura do pavimento, diminui-se o volume de escavação e de solo a movimentar consequência da menor quantidade de escavações. Para além disso, a minimização da exploração de pedreiras e áreas de empréstimo para obter materiais adequados. Os custos decorrentes do transporte dos materiais, não são apenas os custos dos camiões mas também os associados ao dano das estradas, poluição do ar, ruído e congestionamento de tráfego criado pela interrupção de estradas. Estes fatos acarretam vantagens a nível económico e ambiental.

Inerente ao incremento da capacidade resistente, está também ligada a diminuição da espessura das camadas betuminosas. Sendo estas as mais onerosas, o resultado final, em termos económicos, será vantajoso, como se demonstrará no capítulo 4.

As vantagens do uso do solo-cimento estão ainda relacionadas com a facilidade de execução dos terra-pletos mesmo em más condições meteorológicas (o que facilita o cumprimento de prazos) e facilita a construção de aterros em zonas de difícil acesso ou com restrições geotécnicas.

A opção pelo solo-cimento, por depender do preço elevado do cimento e a sua variabilidade, requer um estudo económico cuidado. Para além do custo do material, deve ser contabilizado o custo do transporte deste para a obra.

A necessidade de equipamento pesado específico (que requer grande investimento) para a mistura e a falta de experiência por parte dos contratantes é também uma limitação, assim como as condições meteorológicas. Se a opção for pela mistura por via seca (ou semi-húmida), o aparecimento de ventos fortes pode limitar o espalhamento do cimento, já que este não deve ser espalhado sob estas condições. Também as temperaturas baixas e o gelo, podem ser restritivos ao seu bom desempenho.

A inexistência de solos de boa qualidade para serem misturados, também é uma limitação ao uso de solo-cimento, pois a falta destes terá que ser compensada por solos de melhor qualidade ou corrigindo os existentes. Também no caso de obras muito longas, onde os materiais podem ter uma variabilidade muito grande, pode haver dificuldades para assegurar a boa qualidade do tratamento do solo *in situ*.

Por fim, há também a referir que utilizações de solo-cimento mal sucedidas, levam a “má reputação” desta técnica.

Note-se que segundo Rios (2011), a aplicação desta técnica depende principalmente do ambiente legal e económico e do conhecimento a que se pode aceder. Em alguns países de África, por exemplo, não há conhecimento ou equipamento adaptado mas o tratamento do solo é usado por não haver alternativas.

2.4 CONCEÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM SOLO-CIMENTO

2.4.1 Metodologia empírico-mecanicista para dimensionamento de pavimentos flexíveis

Métodos empírico-mecanicistas são os que integram modelos de comportamento dos materiais e do pavimento em conjunto (aproximação analítica ou racional do dimensionamento), ponderados com a experiência que resulta da observação do comportamento real dos pavimentos.

Este método de dimensionamento de pavimentos flexíveis é constituído por uma série de passos que serão a partir daqui descritos:

- 1) Estabelecimento/pré-definição das espessuras das camadas constituintes do pavimentos e da composição dos materiais. Em relação às misturas betuminosas, devem ser definidos os valores da percentagem volumétrica do betume, v_b ; percentagem volumétrica de agregado, v_a e volume de vazios na mistura de agregados, VMA. Do betume é necessário o conhecimento da penetração a 25°C, pen25 e temperatura anel e bola, T_{AB} ;
- 2) avaliação preliminar do tráfego, o número de eixos padrão a solicitar o pavimento durante a sua vida útil (20 anos, para pavimentos flexíveis) e da temperatura de serviço;
- 3) cálculo da rigidez do betume. Nesta fase, é necessário a definição de uma velocidade para a corrente de tráfego de pesados
- 4) cálculo do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, E_m , por exemplo recorrendo ao método da Shell (Shell, 1977);
- 5) definição do módulo de deformabilidade da fundação (E_f), por exemplo, a partir da expressão

$$E_f = 10 \times CBR \quad (3)$$

sendo CBR, o índice CBR em percentagem e E_f em MPa;

- 6) cálculo do módulo de deformabilidade da base (E_b) e sub-base (E_{sb}), função do módulo de deformabilidade da fundação, por exemplo, a partir das expressões (4) e (5):

$$E_b = 2 \times E_f \quad (4)$$

$$E_{sb} = 2 \times E_b \quad (5)$$

- 7) cálculo do estado de tensão-deformação usando um *software* de cálculo (Elsym5 ou Alize por exemplo) para obter-se a extensão de tração na base das camadas betuminosas, ε_t , a tensão na base da camada com ligante hidráulico, no caso, o solo-cimento, σ_{sc} e a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação, ε_{dp} ;
- 8) cálculo do número de eixos padrão que o pavimento suporta (N_{adm}) para os três critérios de ruína: fadiga das camadas betuminosas, fadiga da camada de solo-cimento e deformação permanente (Figura 1), por exemplo, a partir das fórmulas da Shell, que se indicam em (6) a (9):

$$\varepsilon_t = k_t \times N_{t,adm}^{-0,2} \quad (6)$$

$$k_t = (0,856 \times v_b + 1,08) \times E_m^{-0,36} \quad (7)$$

$$\text{ou: } 3,0 \times 10^{-3} \leq k_t \leq 3,5 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{sc} = (a + b \times \log(N_{sc,adm})) \times R_t \quad (8)$$

$$\varepsilon_{dp} = k_s \times N_{dp,adm}^{-0,25} \quad (9)$$

$$k_s = 1,8 \times 10^{-2}$$

sendo que:

- a, b constantes dependentes da composição e propriedades da mistura de solo-cimento;
 R_t resistência à tração em flexão, do provete de solo-cimento.

- 9) avaliação do dano, conhecendo N_{80} ou N_{130} (número de eixos padrão que solicitam o pavimento, N_{real}) e N_{adm} :

$$dano = \frac{N_{admissivel}}{N_{real}} \quad (10)$$

que deve estar no intervalo, $0,8 \leq dano \leq 1,0$ para uma estrutura bem dimensionada. Se este valor for inferior a 0,8, o pavimento está subdimensionado, se for superior a 1,0 está sobredimensionado. Trata-se de um processo iterativo, em que se varia a espessura das camadas e as características dos materiais constituintes do pavimento, até que o dano se encontre dentro do intervalo desejado.

Refere-se que o dimensionamento de pavimentos é um processo iterativo, no qual se testam a espessura das camadas e as características dos materiais constituintes do pavimento até que o dano se encontre dentro do intervalo desejado.

Os parâmetros considerados nesta dissertação são:

- i. eixo padrão de 130 kN, com 12,5 cm de raio de impressão do rodado, distância entre eixos de 0,375 m e pressão de enchimento dos pneus de 0,662 MPa, como ilustrado na Figura 9;

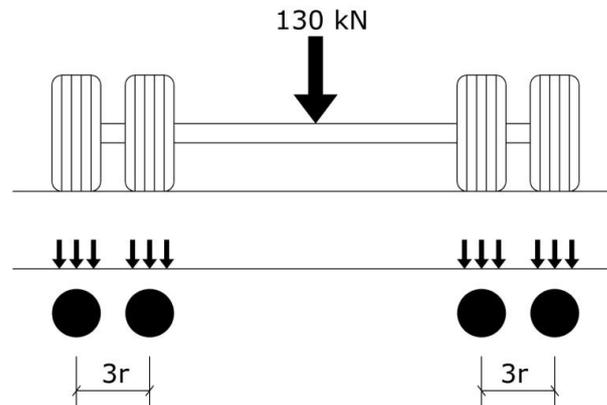


Figura 9 - Eixo Padrão

- ii. módulo de deformabilidade (E);
 iii. coeficiente de Poisson (ν) dos materiais das camadas e fundação em função das características de composição dos materiais e características climáticas da região e modelo estrutural do pavimento;
 iv. espessura das camadas do pavimento.

Os critérios de dimensionamento referem-se às três camadas da estrutura do pavimento: misturas com ligantes betuminosos, misturas com ligantes hidráulicos e solo de fundação. No solo de fundação o objetivo é limitar a ocorrência de excessivas deformações permanentes e consequente aparecimento de cavados de rodeira à superfície do pavimento; nas misturas com ligantes betuminosos é limitar o fendilhamento por fadiga e consequente aparecimento de fendas á superfície e nas misturas com ligantes hidráulicos é limitar a ocorrência de fendilhamento térmico e consequente aparecimento de fendas á superfície do pavimento.

Em relação às misturas com ligantes hidráulicos, o tema desta tese e portanto aquele que merece um maior aprofundamento, o critério de dimensionamento a verificar fixa o número de aplicações de carga solicitante em função da relação entre as tensões máximas de tração induzidas na zona inferior desta camada pelos rodados e a tensão de rotura da mistura nessa camada. Esta limitação, como já foi explicado, visa impedir a rotura por fadiga em tração daquela camada, que dá origem a fissuras que poderão propagar-se até à superfície do pavimento.

A “plataforma” europeia Cordis, através da sua publicação COST333 – “Desenvolvimento de novos métodos de dimensionamento de pavimentos betuminosos” (Cost 333, 1999) procura dar respostas aos problemas relacionados com o dimensionamento de pavimentos flexíveis, nomeadamente os que consideram solo-cimento.

Nesta publicação, o continente europeu é dividido em diversas regiões, incluindo-se Portugal na “região mediterrânica mais quente”. Os métodos de dimensionamento europeus são calibrados empiricamente para depender de fatores climáticos, métodos de construção e dos materiais usados, o que cria dificuldades de aplicação nos diversos países.

No COST333 (Cost333, 1999) é feita uma revisão dos métodos de dimensionamento atuais, com o intuito de criar base para o desenvolvimento de novos métodos. Geralmente é usada a teoria elástica linear para calcular os valores admissíveis de tensão ou deformação em locais críticos da estrutura do pavimento. No entanto existem algumas diferenças entre os diferentes métodos usados, por exemplo configurações de carga, temperatura equivalente do pavimento e frequência de carga. Em consequência destas diferenças, a espessura de projeto do pavimento para o mesmo tráfego varia muito entre países.

As formas mais comuns de deterioração observadas em pavimentos flexíveis foram os afundamentos ocorridos na superfície do asfalto e fissuras superficiais. A deformação estrutural (originada no subleito) e as fissuras por fadiga foram consideradas pouco habituais, devido a critérios de dimensionamento conservativos.

Os dados provenientes de modelos fundamentais de deterioração de pavimentos devem ser analisados com o intuito de comparar com o desempenho medido. Este procedimento permite obter comentários para validar ou identificar as deficiências do modelo antes de serem feitos ajustes. O projeto PARIS (*Performance Analysis of Road Infrastructure*) fornece informações sobre as formas observadas que não foram consideradas pelos atuais modelos de dimensionamento.

No capítulo 10 do COST 333 são apresentados os “modelos para o dimensionamento dos pavimentos”, que usam modelos de resposta simples para calcular as tensões e deformações induzidas por uma carga por eixo nos pontos críticos da estrutura do pavimento. Estes são considerados nas posições em que há maior risco de deterioração.

Dos modelos apresentados por COST 333 (Cost333, 1999) é salientada a Teoria Multicamada, assim como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Elementos Discretos (MED).

A Teoria Multicamada, refere-se a materiais sólidos e assenta em três hipóteses básicas: o equilíbrio, a compatibilidade entre deformações normais e de corte e as equações constitutivas (muitas vezes a lei de Hooke).

Pelo MEF é possível calcular a resposta da estrutura sob efeito de cargas estáticas e dinâmicas e pelo Método dos Elementos Distintos (MED) é possível modelar materiais. Este método não é usado para a modelação completa da estrutura do pavimento, dada a sua complexidade e exigências computacionais..

Os modelos e *softwares* de dimensionamento de pavimentos considerados no COST333, são os expostos na Tabela 3:

Tabela 3 - Modelos e *softwares* para dimensionamento de pavimentos [COST 333, 1999]

| Nome | Método utilizado como Modelo de Resposta | Parâmetros cobertos | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--|---------------------|-----------|--------------|-----------|--------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|------------------|------------------|--------|-----------------|
| | | Não linear | Reológico | Anisotrópico | Interface | Efeitos Climáticos | Carregamento Dinâmico | Efeitos do eixo | Características do | Estocástico | Propagação das fissuras | Efeitos Térmicos | Danos Acumulados | Fadiga | Def. Permanente |
| APAS-WIN | Multicamada | - | - | - | - | • | - | • | • | - | - | • | - | • | - |
| AXIDIN | Axissimétrico FEM | - | - | - | - | - | • | - | - | - | - | - | - | - | - |
| BISAR/SPDM | Multicamada | - | - | - | • | • | - | • | - | - | - | - | - | • | • |
| CIRCLY | Multicamada | - | - | • | • | - | - | • | • | - | - | - | • | • | - |
| CAPA-3D | 3D-FEM | • | • | • | • | - | • | - | • | - | • | • | - | - | - |
| CESAR | 3D-FEM | • | • | • | • | • | • | - | • | • | • | - | • | • | • |
| ECOROUTE | Multicamada | - | - | - | • | - | - | - | • | - | - | - | • | - | - |
| ELSYM5 | Multicamada | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| KENLAYER | Multicamada | • | • | - | • | - | • | - | • | - | - | - | • | • | • |
| MICHPAVE | Axissimétrico FEM | • | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | • | • |
| MMOP | Multicamada | • | - | - | - | • | • | • | • | • | • | - | - | - | - |
| NOAH | Multicamada | - | - | • | • | • | - | • | - | • | - | - | - | • | • |
| ROADENT | Multicamada | - | - | - | • | • | - | • | • | - | - | - | - | - | - |
| SYSTUS | 3D-FEM | • | • | • | • | - | • | - | • | - | • | - | - | - | - |
| VAGDIM 95 | Multicamada | - | - | - | - | • | - | - | - | - | - | • | • | • | • |
| VEROAD | Multicamada | - | • | - | - | - | - | • | • | - | - | - | - | - | • |
| VESYS | Multicamada | - | • | - | - | • | - | • | • | • | - | - | • | • | • |

2.4.2 MANUAIS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Para cumprimento do ponto 1), referido em 2.4.1, em Portugal, o pré-dimensionamento de pavimentos flexíveis é feito através do Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1995) que organiza em forma de catálogo, um conjunto de estruturas tipo a adotar em estudo prévio para os pavimentos da faixa de rodagem. Este catálogo, por ser baseado em métodos expeditos, está condicionado em termos de materiais, de tráfego e de fundação, portanto deve ser feito um estudo

prévio relativo a estas condicionantes. A ação do eixo padrão considerado neste manual, é de 80 kN, diferente do considerado em França, Espanha e nos mais recentes pavimentos feito no nosso país, que se encontram normalmente entre 100 e 130 kN.

Devido a esta diferença, entre a carga considerada nos diferentes tipos de eixo padrão (80 e 130 kN), é necessário o uso de fatores de agressividade para conversão de um tipo de eixo no outro de modo a homogeneizar o estrago dos dois tipos de eixos. Esses fatores, dependentes do tráfego, estão compilados na Tabela 4:

Tabela 4 - Fatores de Agressividade para o eixo padrão de 130 kN

| Classe de Tráfego | α_{130} |
|-------------------|----------------|
| T_6 | 0,3 |
| T_5 | 0,4 |
| T_4 | 0,6 |
| T_3 | 0,6 |
| T_2 | 0,7 |
| T_1 | 0,8 |

A metodologia seguida pelo manual português para o pré-dimensionamento baseia-se nos seguintes princípios:

- definição da estrutura tipo para pavimentos flexíveis tendo por base a associação de diversos tipos de materiais para as camadas constituintes;
- consideração das condições extremas mais desfavoráveis das classes de tráfego e fundação, para determinação das espessuras propostas, pelo que, em face das condições reais a definir em fase de projeto de execução, as soluções propostas deverão ser ajustadas;
- consideração de uma plataforma base da classe F_3 , indicando-se a correção de espessuras para outro tipo de plataformas;
- variação das espessuras das camadas de acordo com a classe de tráfego (T_1 a T_6).

O MACOPAV (JAE, 1995) considera fundação do pavimento, para além do leito do pavimento, as camadas subjacentes a este. Para o dimensionamento deve analisar-se o terreno até 1 m de profundidade. A superfície do leito do pavimento é a plataforma de apoio do pavimento.

No caso de solos tratados *in situ* como pode ser, por exemplo, o solo-cimento, o manual considera duas classes de solos, Tabela 5:

Tabela 5 - Classes de solos a serem tratados com cimento

| Classe de solo | Tipo de material | Características |
|----------------|--|---|
| ST_1 | Solo tratado com cal | CBR imediato > 8% |
| ST_2 | Solo tratado com cimento (eventualmente também com cal) | CBR imediato > 15% $R_{cd}(28 \text{ dias}) > 0,2 \text{ MPa}$ |

O quadro seguinte relaciona a classe de fundação com a classe de solo para as camadas de leito do pavimento em materiais ligados com ligantes hidráulicos. É conveniente considerar-se sempre uma camada de leito de pavimento na parte superior da terraplenagem com características adaptadas às características dos materiais empregues e da classe de plataforma pretendida, Tabela 6.

Tabela 6 - Características dos materiais e classe de plataformas, MACOPAV (JAE, 1995)

| | E_f (MPa) CBR (%) | F2 | F3 | F4 |
|-------|------------------------|------------------|------------------|--------|
| | | >50 a ≤80 | >80 a ≤150 | >150 |
| S_0 | <3 | Estudo especial | | |
| S_1 | ≥3 a <5 | 40 ST1 ou 25 ST2 | 40 ST2 | - |
| S_2 | ≥5 a <10 | - | 40 ST1 ou 25 ST2 | 40 ST2 |
| S_3 | ≥10 a <20 | - | - | 25 ST2 |
| S_4 | ≥20 | - | - | - |

A estrutura tipo obtida a partir do manual deve ser alvo de ajustes às condições locais, pois este, por se tratar de um catálogo de pré-dimensionamento, não é aplicável em projeto de execução. Nesta fase devem ser feitos cálculos de verificação da capacidade de carga das estruturas projetadas, tendo em atenção os estudos específicos realizados no seu âmbito (estudo de tráfego, geológico e geotécnico). Portanto, para a verificação das estruturas precisa-se:

- do valor real do tráfego de dimensionamento;
- das características mecânicas da fundação;
- das características mecânicas dos materiais de pavimentação, tendo em atenção as condições climáticas locais e os materiais efetivamente disponíveis.

As mesmas condições de tráfego e de fundação não resultam diretamente no mesmo tipo de estrutura, deve ser feita uma análise às opções existentes de acordo com as condições económicas inerentes.

A estrutura do pavimento preconizada pelo MACOPAV é a indicada na Figura 10:

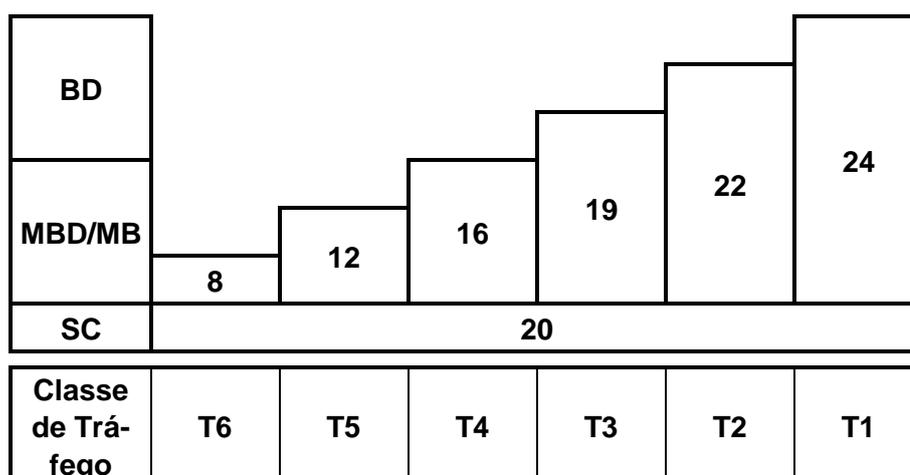


Figura 10 - Estrutura de pavimento flexível com solo-cimento (cm), MACOPAV (JAE, 1995)

Onde:

BD betão betuminoso em camada de desgaste;

| | |
|-----|--|
| MBD | mistura betuminosa densa em camada de regularização; |
| MB | macadame betuminoso em camada de base/regularização; |
| SC | solo-cimento. |

A espessura total de misturas betuminosas para outra classe de plataforma deve ser corrigida acrescentando 4 cm se a fundação for da classe F2, se for da classe F1 ou F4 esta estrutura não é adequada.

A camada de solo-cimento deverá ter uma espessura mínima de 15 cm e não são admissíveis variações transversais da sua espessura em pavimentos flexíveis.

O Asphalt Institute (AI, 1981) apresenta também métodos expeditos para pré-dimensionamento de pavimentos rodoviários, que se baseiam em ábacos de definição da espessura das camadas betuminosas, função do número de eixos padrão acumulados, módulo de deformabilidade do solo de fundação e a espessura das camadas granulares.

Relativamente ao módulo de deformabilidade do solo de fundação, o procedimento espanhol, através da “Dirección General de Carreteras” (DGC), no documento “Secciones de Firme – Instrucción de carreteras Norma 6.1 IC” (DGC, 2010), caracteriza a fundação do pavimento através de um ensaio de carga com placa. É atribuída uma resistência em função do módulo de reação obtido no segundo ciclo desse ensaio, que define as condições de execução com determinados materiais. Também este documento (DGC, 2010), tal como o MACOPAV (JAE, 1995), associa o número de veículos pesados no ano de entrada ao serviço da via de projeto à classe de fundação, Tabela 7.

Tabela 7 - Módulo de deformabilidade no segundo ciclo de carga, DGC

| Classe da Fundação | E1 | E2 | E3 |
|--------------------|-----|------|------|
| Módulo de reação | ≥60 | ≥120 | ≥300 |

Tabela 8 - Categorias de Trafego Pesado, DGC

| Classe de Trafego | T00 | T0 | T1 | T2 | T31 | T32 | T41 | T42 |
|-------------------|--------------------------|-------|----------------|---------------|--------------|--------------|-------------|------------|
| | Veículos pesados por dia | ≥4000 | <4000 ≥2000 | <2000 ≥800 | <800 ≥200 | <200 ≥100 | <100 ≥50 | <50 ≥25 |

Por fim, apresenta-se a tabela de pré-dimensionamento da estrutura do pavimento em função da categoria do tráfego pesado, Tabela 9:

Tabela 9 - Estruturas para Tráfego Pesado segundo o procedimento espanhol (adaptado do DGC, 2010)

| | Categoria de Trafego Pesado | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|---------|---------|---------|
| | T00 | T0 | T1 | | T2 | | T31 | T32 | T41 | T42 | |
| Classe da Fundação | E1 | - | - | - | MB - 18 | | MB - 15 | MB - 12 | MB - 8 | MB - 5 | |
| | | | | | SC-30 | | SC - 30 | SC - 30 | SC - 30 | SC - 25 | |
| | E2 | - | - | MB - 30 | MB - 15 | MB - 18 | MB - 15 | MB - 12 | MB - 10 | MB - 8 | MB - 5 |
| | | | | SC - 25(1) | GC - 22 | SC - 22(1) | GC - 20(1) | SC - 30 | SC - 30 | SC - 25 | SC - 22 |
| | | | SC - 22 | SC - 20 | | | | | | | |
| E3 | MB - 25 | MB - 20 | MB - 20 | | MB - 15 | | MB - 12 | MB - 10 | MB - 8 | MB - 5 | |
| | SC - 30 | GC - 22(1) | SC - 20(1) | | SC - 20(1) | | SC - 22 | SC - 22 | SC - 20 | SC - 20 | |
| | | SC - 25 | | | | | | | | | |

MB – Mistura Betuminosa;

GC – Grava-cimento;

SC – solo-cimento

(1) – Camadas tratadas com cimento, para fissurarem com espaçamentos de 3 a 4 m, de acordo com o artigo 513 das Especificações Técnicas Gerais (PG-3)

No que diz respeito à realidade francesa, através dos guias técnicos do LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) (LCPC, 1994) a espessura é estabelecida de modo a verificar os diversos critérios de resistência, permitindo uma colocação correta do leito e assegurar um valor mínimo de capacidade a longo prazo da plataforma. Esta espessura depende da parte superior do terrapleno (PST) e da capacidade de suporte a longo prazo da parte superior do aterro (AR).

A capacidade de suporte da plataforma é dividida em quatro classes, dependendo do seu módulo de deformabilidade, Tabela 10:

Tabela 10 - Capacidade de Suporte da Plataforma (MPa), LCPC (1994)

| Módulo de deformabilidade (MPa) | 20 | 50 | 120 | 200 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Classe de Plataforma | PF1 | PF2 | PF3 | PF4 |

No que diz respeito ao leito do pavimento tratado com cimento e/ou cal, *in situ*, as espessuras preconizadas encontram-se na Tabela 11:

Tabela 11 - Espessura do Leito do Pavimento em material tratado (LCPC, 1994)

| Classe de AR | Classe de Plataforma | Material do leito do pavimento | Espessura |
|--------------|----------------------|--|-------------------------|
| AR1 | PF3 | A1, A2, A3 tratado com cal e cimento, eventualmente só cimento | 0,50m (em duas camadas) |
| AR2 | | | 0,50m |

A espessura é estabelecida com o intuito de verificar os diversos critérios de resistência, permitindo uma colocação correta do leito e assegurar a perenidade.

Os guias técnicos do LCPC referem-se também a técnicas de preparação e proteção dos materiais para aplicação em leito do pavimento, abrangendo quatro rubricas: ação sobre a granulometria; ação sobre o teor de humidade; tratamento e proteção superficial.

Relativamente ao solo-cimento, neste manual as rubricas tratamento e proteção superficial são importantes e merecem que estas sejam desenvolvidas. O tratamento está dividido em sete níveis, desde o zero em que não é recomendado qualquer tratamento até aos seis em que se recomenda o tratamento com corretor granulométrico. No nível 1 é recomendada a técnica de tratamento com ligante hidráulico, no 2, tratamento com ligante hidráulico eventualmente associado com cal, no 3, tratamento misto: cal e ligante hidráulico, no 4, tratamento só com cal e no 5, tratamento com ligante hidráulico e eventualmente com corretor granulométrico.

A proteção superficial está dividida em quatro níveis: 0, sem recomendações especiais; 1 revestimento de cura, eventualmente com gravilha; 2, revestimento de cura com gravilha e eventual incrustação de agregados e 3, camada final de regularização.

No caso de solos tratados com ligantes hidráulicos é importante manter o estado hídrico constante durante o período de cura. Por isso, é conveniente uma proteção que mantenha a camada pouco permeável (à evaporação e percolação) durante este período.

3

Influência do solo-cimento na resposta estrutural e no dimensionamento de pavimentos flexíveis

Neste capítulo será analisada a influência que as camadas de solocimento têm na resposta estrutural e no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Para tal, será feito o estudo, nas secções 3.2 a 3.4, o estudo do comportamento estrutural de pavimentos, através do programa de cálculo ALIZE, para diferentes características e espessuras das camadas de betuminoso e de solo-cimento. Antecedendo o estudo, é feita uma breve introdução ao método de cálculo e aos modelos de cálculo, estrutural, material e de carregamento (secção 3.1).

3.1. DESCRIÇÃO DA MODELAÇÃO

3.1.1. MÉTODO DE CÁLCULO

O método de cálculo considerado na análise estrutural agora apresentada foi já explanado no capítulo anterior. Assim, considera-se uma metodologia simples de cálculo, que se baseia na teoria de Burmister. De acordo com esta teoria, um pavimento é um sistema de multicamadas horizontais, semi-infinitas, contínuas, homogéneas, de espessura constante e constituídas por materiais isotrópicos com comportamento elástico-linear assentes sobre um espaço semi-infinito (meio espaço de Boussinesq). Este método de cálculo implica simplificações, tais como, considerar os materiais com comportamento elástico linear, sendo que o comportamento mecânico se caracteriza pelo módulo de rigidez (E) e pelo coeficiente de Poisson (ν). Também o modelo de carregamento é simplificado: não se considera o carácter dinâmico da carga e considera-se a tensão de contacto uniforme e aplicado sobre uma área circular, tal como ilustrado na Figura 9.

Existem ainda outras limitações que se passam a referir:

- a distribuição espacial das propriedades dos materiais dos pavimentos;
- a presença de descontinuidades no pavimento, tais como fissuras ou juntas;
- o comportamento não-linear dos solos e dos materiais granulares não ligados;
- o comportamento viscoelástico dos materiais betuminosos;
- a anisotropia dos materiais constituintes dos pavimentos;
- as ações dinâmicas induzidas pelos veículos;
- as distribuições reais da pressão de contacto entre os pneus dos veículos e os pavimentos.

O programa de cálculo utilizado no âmbito desta tese é o ALIZE, porque:

- 1) a sua aplicação é relativamente simples;
- 2) os resultados são idênticos aos obtidos com outros softwares, como demonstra Brás (2011).

3.1.2. MODELO ESTRUTURAL

O modelo estrutural considerado no ALIZE para representar o pavimento é o axissimétrico. Este modelo é bastante usado para estruturas (de pavimento) com geometria e carregamento simétricos em relação a um eixo de revolução, devendo a área de carregamento circular (ou anelar) ser também simétrica em relação ao mesmo eixo, como indicado na Figura 9. Pode-se dizer que o modelo axissimétrico reduz um modelo complexo de três dimensões a um modelo mais simples de duas dimensões, daí ser um dos modelos mais usados para o dimensionamento de pavimentos.

Por uma questão de simplificação considera-se todas as camadas coladas e as características mecânicas (módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson) são as preconizadas no MACOPAV (JAE, 1995).

3.1.3. MODELO MATERIAL

Considerou-se o modelo material para os materiais constituintes do pavimento porque a utilização do método de cálculo, baseado na teoria de Burmister condiciona a escolha do modelo material para os constituintes do pavimento e o dimensionamento proposto pelo MACOPAV (e no qual se baseia este estudo), considera que o comportamento dos materiais de pavimentação é caracterizado pela elasticidade linear. Como esta secção se baseia no manual de pré-dimensionamento português, não faria sentido considerar diferentes modelos materiais.

Estudos realizados por Vale (2004 e 2006) descrevem os modelos de comportamento dos materiais betuminosos e dos materiais granulares (não estabilizados). São abordados os modelos de elasticidade linear e de viscoelasticidade linear dos materiais betuminosos e os modelos materiais de elasticidade linear e não linear dos materiais granulares (não tratados). Os que têm interesse para esta tese, são os modelos materiais de elasticidade linear para os dois tipos de materiais.

Os materiais betuminosos, nas condições habituais de serviço, apresentam comportamento altamente dependente da temperatura e do tempo de aplicação da carga, comportamento que é descrito pelo modelo elástico linear. Para fins de dimensionamento, é o modelo elástico linear que se adota, para colmatar esta simplificação, procura-se adotar diferentes valores para o módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson, variáveis em função das condições de temperatura e tempo de aplicação de carga. Neste capítulo, como se verá adiante (secção 3.3.2), apenas a variação do módulo de deformabilidade foi explorada.

Também a modelação dos materiais granulares (com e sem tratamento) e solo de fundação como camadas homogêneas, contínuas, isotrópicas e elástico-lineares corresponde a uma simplificação da realidade. No entanto, nos modelos de previsão do comportamento dos pavimentos habitualmente usados, bem como no contexto do MACOPAV, é assim que estas camadas são idealizadas.

Na secção 3.4.2 será feito o estudo do comportamento da camada de material granular tratada (com solo-cimento), variando o módulo de deformabilidade.

Na Tabela 12 indicam-se as características dos materiais usados na estrutura do pavimento considerados no MACOPAV, o módulo de deformabilidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν).

Tabela 12 - Características dos Materiais de Pavimento, MACOPAV (JAE, 1995)

| material | E [MPa] | ν |
|-----------------------------|----------------|-------------------------|
| Misturas betuminosas | 4000 | 0,35 |
| Base granular | $2 * E_{sb}$ | 0,35 |

| | | |
|--------------------------|-----------|------|
| Sub-base granular | $2 * E_f$ | 0,35 |
| Solo-cimento | 2000 | 0,30 |

O MACOPAV considera o módulo de deformabilidade das camadas granulares duas vezes o da camada subjacente, ou seja, no caso da camada de sub-base o módulo é duas vezes o do solo de fundação e no caso da camada de sub-base é o dobro do módulo da camada de sub-base.

O módulo do solo de fundação é função da classe de tráfego, no caso a estudar adotou-se classe de fundação F_3 , que corresponde a um módulo de 100 MPa.

De referir que nos estudos paramétricos, a apresentar nas secções 3.3 a 3.4, que pretendem analisar a influência das camadas betuminosa e da camada de solo-cimento, considera-se que os materiais de pavimentação apresentam carregamento elástico linear.

3.1.4. MODELO DE CARREGAMENTO

O modelo de carregamento considerado neste estudo consiste numa carga estática de distribuição uniforme no tempo. Esta carga, traduz-se na ação estática induzida pelos pneus no pavimento, sobre uma área circular. Considera-se, por simplificação, que a magnitude da componente vertical da carga é igual à pressão de enchimento dos pneus.

No âmbito desta tese foi apenas feito o estudo para o caso de eixos padrão de 130 kN (Figura 9), cujo raio da área circular de contacto pneu/pavimento é de 12,5 cm; por isso a pressão de contacto vale 6,62 MPa.

3.2. ANÁLISE ESTRUTURAL DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS INDICADAS NO MACOPAV

As estruturas analisadas nesta secção correspondem aos três pavimentos flexíveis preconizados no MACOPAV (Figura 11, Figura 12 e Figura 13), para a classe de plataforma F3 e de tráfego T5. Nestas figuras, as siglas BD, MB, MBD, SbG, BG e Sc significam respetivamente betão betuminoso em camada de desgaste, macadame betuminoso em camada de base, mistura betuminosa densa em camada de regularização, material britado sem recomposição aplicado em camada de sub-base, material britado sem recomposição aplicado em camada de base e solo-cimento.

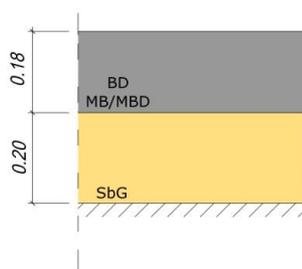


Figura 11 - Estrutura de pavimento flexível 1, MACOPAV (JAE, 1995)

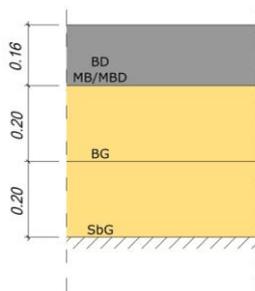


Figura 12 - Estrutura de pavimento flexível 2, MACOPAV (JAE, 1995)

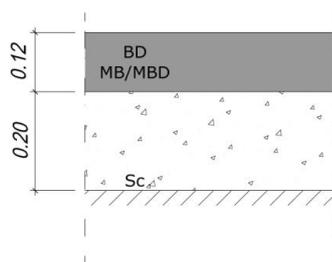


Figura 13 - Estrutura de pavimento flexível 3, MACOPAV (JAE, 1995)

Na Tabela 13 apresentam-se os resultados obtidos com o ALIZE, relativos à resposta estrutural dos 3 pavimentos apresentados. De realçar que, nesta tabela, os valores da extensão radial de tração (ϵ_t) são avaliados na base das camadas betuminosas, a tensão horizontal de tração (σ_{Sc}) na base da camada de solo-cimento (se esta existir) e a extensão vertical máxima de compressão (ϵ_{dp}) no topo do solo de fundação (Figura 14). Estas grandezas permitem calcular o número admissível de eixos padrão equivalente para cada critério de ruína: fadiga das camadas betuminosas, fadiga da camada de solo-cimento e deformação permanente das camadas granulares. Estes valores estão também indicados na Tabela 13.

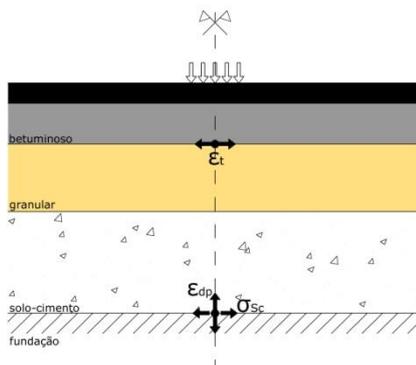


Figura 14 - Parâmetros em análise

Relembrando as expressões (7), (9) e (10):

$$\epsilon_{t,adm} = k_t \times N_{t,adm}^{-0,2}$$

$$\sigma_{Sc,adm} = (1 - 0,08 \times \log(N_{Sc,adm})) \times R_t$$

$$\epsilon_{dp,adm} = k_s \times N_{dp,adm}^{-0,25}$$

E adotando as simplificações do MACOPAV (JAE, 1995):

$$k_t = 3,5 \times 10^{-3};$$

$$R_t = 640 \text{ kPa};$$

$$k_s = 1,8 \times 10^{-2}$$

Construiu-se a seguinte tabela:

Tabela 13 - Análise estrutural, estruturas flexíveis 1, 2 e 3 do MACOPAV

| Est | Características da camada | | | desig. | Z [cm] | $\epsilon_{xx} (10^{-6})$ | Nadm (na base das camadas betuminosas) | σ_{xx} [kPa] | Nadm (na base da camada de solo-cimento) | $\epsilon_{zz} (10^{-6})$ | Nadm (no topo do solo de fundação) |
|-----|---------------------------|-------|----------|-----------|--------|---------------------------|--|---------------------|--|---------------------------|------------------------------------|
| | E [MPa] | ν | e [cm] | | | | | | | | |
| 1 | 4000 | 0,35 | 18 | BD | 0 | 189 | 2 066 205 | 1410 | | 134 | |
| | | | | MBD/MB | 18 | 191 | | 1020 | | 185 | |
| | 200 | 0,35 | 20 | Sbg | 18 | 191 | | 3,98 | | 457 | |
| | | | | | 38 | 195 | | 30 | | 334 | |
| | 100 | 0,40 | infinita | Fundação | 38 | 195 | | 2,07 | | 453 | 2 492 856 |
| 2 | 4000 | 0,35 | 16 | BD | 0 | 172 | 4 855 242 | 1330 | | 115 | |
| | | | | MBS/MB | 16 | 161 | | 826 | | 168 | |
| | 400 | 0,35 | 20 | BG | 16 | 161 | | 12,1 | | 375 | |
| | | | | | 36 | 161 | | 60,5 | | 237 | |
| | 200 | 0,35 | 20 | Sbg | 36 | 161 | | 14,8 | | 327 | |
| | | | | 56 | 145 | | 25,3 | | 244 | | |
| | 100 | 0,40 | infinita | Fundação | 56 | 145 | | 1,54 | | 328 | 9 069 736 |
| 3 | 4000 | 0,35 | 12 | BD | 0 | 136 | 1 220 967 704 | 1130 | | 86,1 | |
| | | | | MBD/MB | 12 | 53,3 | | 133 | | 109 | |
| | 2000 | 0,30 | 20 | Sc | 12 | 53,3 | | 8,27 | 91 398 | 171 | |
| | | | | | 32 | 154 | | 386 | | 122 | |
| | 100 | 0,40 | infinita | Fundação | 32 | 154 | | 3,46 | | 352 | 6 837 847 |

Sendo:

| | |
|-----------------|----------------------------------|
| E | módulo de deformabilidade (MPa); |
| ν | coeficiente de Poisson; |
| Z | Profundidade (cm); |
| ϵ_{xx} | extensão radial de tração; |
| σ_{xx} | tensão radial de tração (kPa); |
| ϵ_{zz} | extensão vertical de compressão; |

Analisando o critério de ruína condicionante em cada estrutura, verificou-se que a estrutura que tem maior capacidade de suporte é a estrutura 2. A estrutura 3, apesar de ter bom desempenho na base das camadas betuminosas e topo do solo fundação, fica condicionada pelo desempenho na base da camada de solo-cimento.

A estrutura 3 tem uma capacidade de suporte na base das camadas betuminosas muito superior a qualquer uma das outras duas estruturas, isso deve-se ao incremento de resistência que esta camada acrescenta à estrutura do pavimento explicada pela diferença de grandeza entre o módulo de deformabilidade deste material comparada com qualquer um dos outros materiais granulares utilizados nas estruturas 1 e 2.

Em relação à extensão de compressão no topo do solo de fundação, verificou-se um comportamento semelhante nos três tipos de estrutura; no entanto, a estrutura 2, pela maior espessura que possui é a que apresenta melhor desempenho neste parâmetro.

3.3. INFLUÊNCIA DA CAMADA BETUMINOSA NA RESPOSTA ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM SOLO-CIMENTO

Nas secções seguintes será considerada, como base a estrutura 3, visto ser a que mais interesse tem no âmbito desta tese, uma vez que é o único pavimento flexível indicado no MACOPAV que tem o solo-cimento como material constituinte.

Nesta secção será feita uma análise com o intuito de verificar a evolução de três parâmetros fundamentais em função da espessura (secção 3.3.1) e das características mecânicas da camada betuminosa (secção 3.3.2), nomeadamente:

1. extensão na base das camadas betuminosas (ϵ_t);
2. tensão na base da camada de solo-cimento (σ_{sc});
3. extensão no topo do solo de fundação (ϵ_{dp}),

3.3.1 Influência da espessura da camada betuminosa

A análise foi feita variando os valores da espessura da camada betuminosa entre 6 e 28 cm. Estes foram os valores escolhidos, visto que 28 cm é o máximo valor admissível pelo MACOPAV para esta camada e 6 cm valor mínimo, possível de ser aplicado, em termos construtivos.

Foram ainda feitos dois estudos: um considerando descolagem entre a última camada (de solo-cimento) e o solo de fundação, e outro considerando todas as camadas coladas. Na Tabela 14 e Tabela 15 apresentam-se os resultados obtidos, respetivamente, em cada uma dessas análises.

Tabela 14 - N_{adm} em função da espessura da camada betuminosa: interface entre solo-cimento e fundação descolada

| emb [cm] | $\epsilon_t (10^{-6})$ | N_{adm} (na base das camadas betuminosas) | σ_{Sc} [kPa] | N_{adm} (na base da camada de solo-cimento) | $\epsilon_{dp} (10^{-6})$ | N_{adm} (no topo do solo de fundação) |
|----------|------------------------|---|---------------------|---|---------------------------|---|
| 6 | 21,9 | 104 260 462 601* | 596 | 7 | 154 | 186 641 036 |
| 8 | 42,4 | 3 832 753 940* | 539 | 94 | 137 | 297 994 159 |
| 10 | 51,1 | 1 507 425 026* | 489 | 890 | 122 | 473 860 707 |
| 12 | 56,8 | 888 379 530* | 444 | 6 732 | 110 | 717 000 205 |
| 14 | 59,0 | 734 649 460 | 404 | 40 679 | 99,2 | 1 084 035 068 |
| 16 | 58,6 | 760 067 463 | 369 | 196 322 | 89,9 | 1 607 130 908 |
| 18 | 56,9 | 880 600 423 | 338 | 791 476 | 81,8 | 2 344 643 433 |
| 20 | 54,5 | 1 092 339 681 | 310 | 2 788 127 | 74,7 | 3 371 379 278 |
| 22 | 51,8 | 1 408 287 820 | 285 | 8 582 104 | 68,4 | 4 795 850 247 |
| 24 | 49,6 | 1 749 572 079 | 263 | 23 082 415 | 62,8 | 6 749 186 754 |
| 26 | 47,6 | 2 149 341 668 | 243 | 56 742 210 | 57,9 | 9 340 621 318 |
| 28 | 45,4 | 2 723 083 493 | 225 | 127 487 836 | 53,5 | 12 813 710 045 |

Tabela 15 - N_{adm} em função da espessura da camada betuminosa: interface entre solo-cimento e fundação colada

| emb [cm] | $\epsilon_t (10^{-6})$ | N_{adm} (na base das camadas betuminosas) | σ_{Sc} [kPa] | N_{adm} (na base da camada de solo-cimento) | $\epsilon_{dp} (10^{-6})$ | N_{adm} (no topo do solo de fundação) |
|----------|------------------------|---|---------------------|---|---------------------------|---|
| 6 | 21,2 | 122 648 126 087* | 513 | 302 | 481 | 1 961 145 |
| 8 | 41,1 | 4 478 484 881* | 466 | 2 503 | 427 | 3 157 756 |
| 10 | 49,4 | 1 785 276 454* | 424 | 16 548 | 387 | 4 680 003 |
| 12 | 53,3 | 1 220 967 704* | 386 | 91 398 | 352 | 6 837 847 |
| 14 | 55,3 | 1 015 580 995 | 352 | 421 697 | 322 | 9 764 872 |
| 16 | 54,9 | 1 053 121 549 | 322 | 1 625 315 | 294 | 14 050 789 |
| 18 | 53,2 | 1 232 486 186 | 295 | 5 473 703 | 270 | 19 753 086 |
| 20 | 50,9 | 1 537 274 099 | 272 | 15 399 265 | 249 | 27 308 172 |
| 22 | 48,4 | 1 977 485 982 | 250 | 41 417 845 | 229 | 38 172 279 |
| 24 | 46,2 | 2 495 343 537 | 231 | 97 337 738 | 212 | 51 969 265 |
| 26 | 44,3 | 3 078 375 477 | 214 | 209 080 004 | 196 | 71 132 117 |
| 28 | 42,3 | 3 878 273 073 | 199 | 410 469 838 | 182 | 95 676 321 |

Em que:

- emb espessura da camada betuminosa;
- ϵ_t extensão na base da camada betuminosa;
- σ_{Sc} tensão na base da camada de solo-cimento;
- ϵ_{dp} extensão no topo do solo de fundação;

(A mesma nomenclatura será usada nas subsecções seguintes)

Pela análise da Tabela 14, observa-se que o critério de ruína condicionante é o de fadiga da camada de solo-cimento. Por exemplo, para um tráfego de 2×10^6 eixos padrão, só a partir dos 20 cm de espessura é que a estrutura se apresenta bem dimensionada.

No que à segunda estrutura considerada (Tabela 15), diz respeito, a partir dos 18 cm esta já estaria bem dimensionada, para o mesmo tráfego e obedeceria aos três critérios em análise.

Verifica-se que, por exemplo, duplicando a espessura da camada, de 12 para 24 cm, a capacidade estrutural do pavimento, em relação à fadiga das camadas betuminosas, quase duplica e resistência à deformação permanente multiplica cerca de sete vezes; em relação à fadiga da camada de solo-cimento, a capacidade aumenta mais de mil vezes. Quer isto dizer que a espessura das camadas betuminosas tem muita influência no critério de fadiga da camada de solo-cimento. Este fato verifica-se para as duas situações analisadas: camadas coladas vs. descoladas.

Na Tabela 15, o critério de ruína condicionante é o de fadiga da camada de solo-cimento, apenas até aos 20 cm de espessura das camadas betuminosas. Para espessuras superiores, o critério que condiciona é o de ruína no topo do solo de fundação.

Comparando as duas estruturas, considerando descolagem ou colagem no interface entre o solo-cimento e o solo de fundação, há um aumento no número de eixos padrão admissíveis na base das camadas betuminosas (cerca de 1,5 vezes) e na base da camada de solo-cimento (cerca de 10 vezes) enquanto no topo do solo de fundação há um decréscimo de cerca de 100 vezes.

A análise foi feita apenas para espessuras superiores a 14 cm, visto que para espessuras inferiores o comportamento deveria ser melhor estudado.

Os gráficos seguintes (Figura 15, Figura 16 e Figura 17) traduzem os resultados obtidos para cada um dos três critérios em análise.

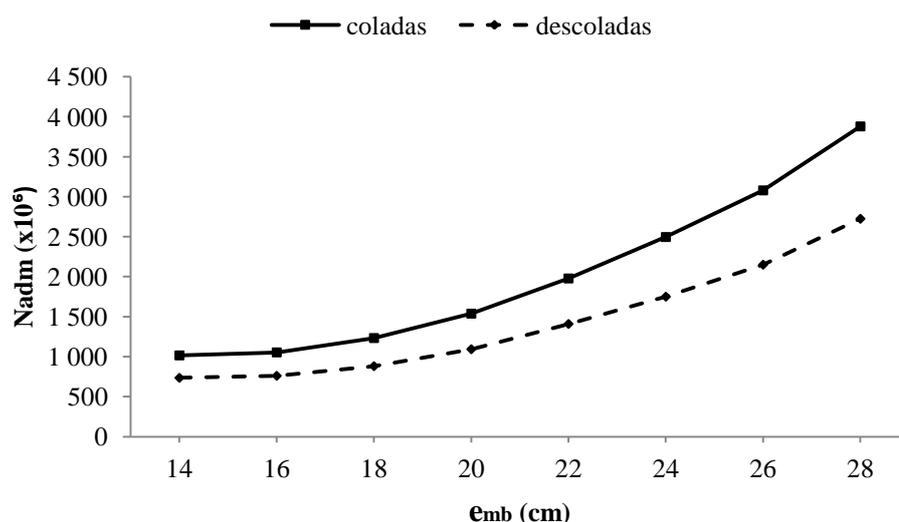


Figura 15 – Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério de fadiga da camada betuminosa

Da Figura 15 que os dois tipos de estrutura (colagem ou descolagem no interface entre solo-cimento e fundação) têm o mesmo comportamento. Como seria de esperar, a capacidade aumenta com o aumento da espessura das camadas betuminosas.

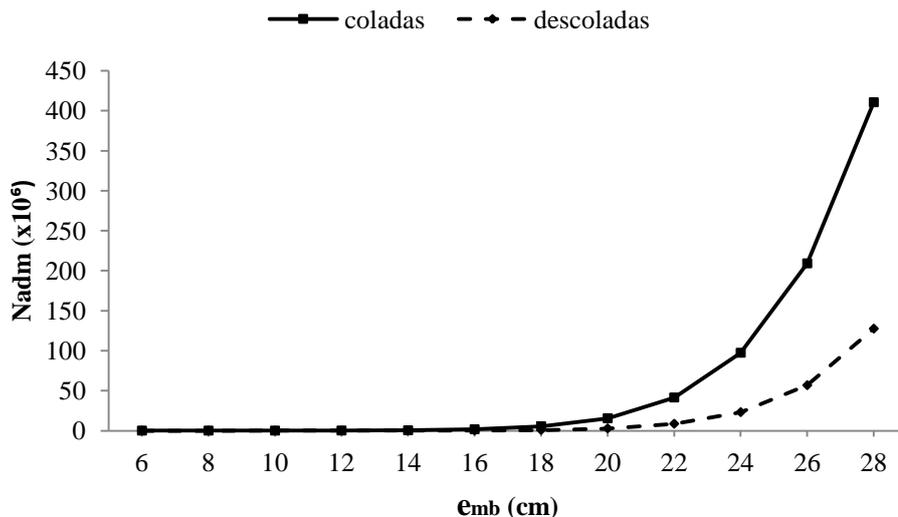


Figura 16 – Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério de fadiga da camada de solo-cimento

Também no gráfico da Figura 16 se observa que ambos tipos de pavimentos têm o mesmo comportamento, neste caso, em relação à fadiga da camada de solo-cimento. Observa-se um crescimento mais acentuado do N_{adm} a partir dos 20 cm. A diferença entre as duas estruturas torna-se considerável, para espessuras superiores a 26 cm. Para espessuras da camada betuminosa inferiores a 20 cm, a influência da camada de solo-cimento é insignificante.

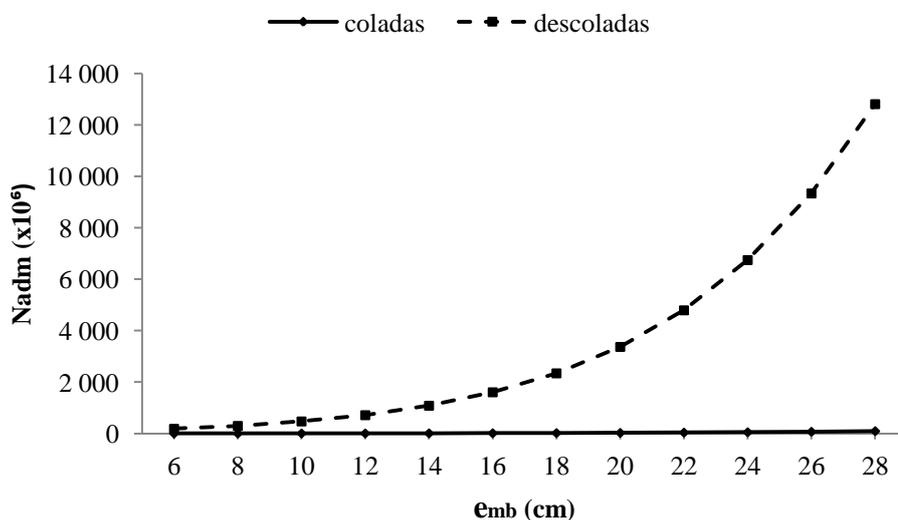


Figura 17 – Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério da deformação permanente

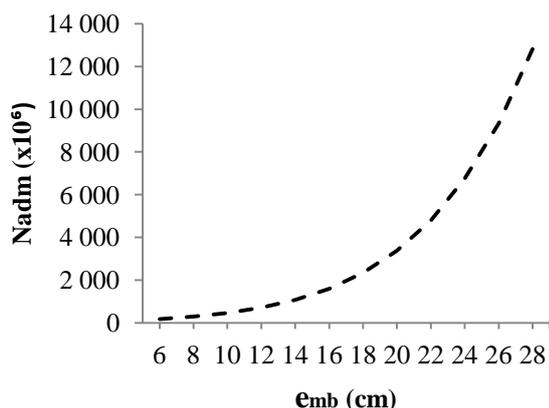


Figura 18 - Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação descolada

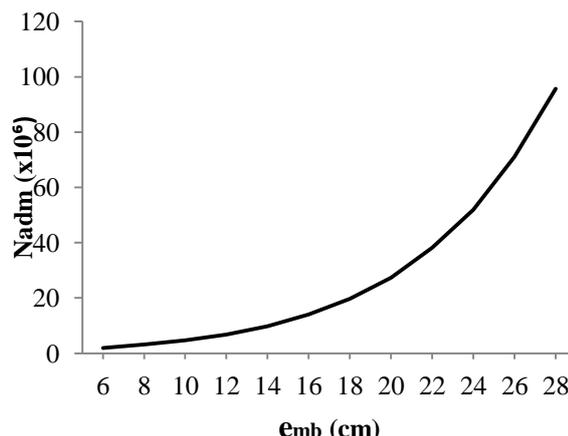


Figura 19 - Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada betuminosa, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada

Nestes gráficos já se observam grandes diferenças entre colagem/descolagem na interface entre a camada de solo-cimento e o solo de fundação. Como se vê na Figura 18 e Figura 19, ambas as estruturas têm o mesmo comportamento mas, como se percebe pela Figura 17, a ordem de grandeza é diferente. Neste caso, a estrutura em que se considerou descolagem nas duas últimas camadas aumenta consideravelmente (cerca de 100 vezes) o número de eixos padrão admissíveis.

Pode-se concluir que a consideração de colagem ou descolagem nas duas últimas camadas tem maior influência no critério de deformação permanente.

Em relação à influência da espessura das camadas betuminosas, o incremento no número de eixos padrão admissíveis é mais acentuado na base da camada de solo-cimento, ou seja, este é o parâmetro mais influenciado pela variação da espessura das camadas betuminosas.

3.3.2 Influência das características mecânicas da camada betuminosa

Tanto nesta como na subsecção 3.4.2, o fator a estudar e que irá variar é o módulo de deformabilidade ou módulo de Young (E), pois este é uma propriedade intrínseca dos materiais e o que melhor caracteriza as propriedades mecânicas do material em estudo.

O estudo não visa o coeficiente de Poisson (ν) porque este apenas mede a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga, pelo que não tem interesse para esta tese.

O valor do módulo de deformabilidade irá variar entre 4000 e 7000 MPa, porque o valor inferior é o preconizado no MACOPAV e pela experiência obtida no caso de estudo (capítulo 4) este não deverá ser superior a 7000 MPa.

Tabela 16 - N_{adm} em função do módulo de deformabilidade da camada betuminosa: interface entre solo-cimento e fundação descolada

| Emb [MPa] | ϵ_t (10^{-6}) | N_{adm} (na base das camadas betuminosas) | σ_{Sc} [kPa] | N_{adm} (na base da camada de solo-cimento) | ϵ_{dp} (10^{-6}) | N_{adm} (no topo do solo de fundação) |
|-----------|----------------------------|---|---------------------|---|-------------------------------|---|
| 4000 | 56,8 | 888 379 530 | 444 | 6 732 | 110 | 717 000 205 |
| 4500 | 58,9 | 740 907 085 | 436 | 9 647 | 107 | 800 856 878 |
| 5000 | 60,4 | 653 364 492 | 429 | 13 216 | 105 | 863 640 150 |
| 5500 | 61,5 | 596 986 682 | 423 | 17 309 | 103 | 932 698 163 |
| 6000 | 62,1 | 568 698 681 | 417 | 22 671 | 101 | 1 008 798 726 |
| 6500 | 62,6 | 546 346 991 | 411 | 29 693 | 99,3 | 1 079 674 953 |
| 7000 | 62,8 | 537 702 435 | 406 | 37 180 | 97,8 | 1 147 452 196 |

Tabela 17 - N_{adm} em função do módulo de deformabilidade da camada betuminosa: interface entre solo-cimento e fundação colada

| Emb [MPa] | ϵ_t (10^{-6}) | N_{adm} (na base das camadas betuminosas) | σ_{Sc} [kPa] | N_{adm} (na base da camada de solo-cimento) | ϵ_{dp} (10^{-6}) | N_{adm} (no topo do solo de fundação) |
|-----------|----------------------------|---|---------------------|---|-------------------------------|---|
| 4000 | 53,3 | 1 220 967 704 | 386 | 91 398 | 352 | 6 837 847 |
| 4500 | 55,4 | 1 006 448 132 | 380 | 119 709 | 346 | 7 324 629 |
| 5000 | 56,9 | 880 600 423 | 374 | 156 788 | 340 | 7 855 509 |
| 5500 | 57,9 | 807 137 273 | 369 | 196 322 | 334 | 8 435 370 |
| 6000 | 58,6 | 760 067 463 | 364 | 245 824 | 329 | 8 959 967 |
| 6500 | 59,1 | 728 455 149 | 359 | 307 809 | 325 | 9 409 284 |
| 7000 | 59,3 | 716 253 496 | 355 | 368 473 | 321 | 9 887 122 |

Da análise da

Tabela 16 e Tabela 17 percebe-se que o critério condicionante em ambos os casos é o de fadiga da camada de solo-cimento: veja-se os valores a negrito. Observa-se que o aumento do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas não tem tanta influência quanto o aumento da espessura das mesmas camadas. Comparando os 4000 e os 7000 MPa, a variação do N_{adm} na base das camadas betuminosas é de quase metade, na base da camada de solo-cimento aumenta cerca de cinco vezes e no topo do solo de fundação aumenta cerca de 1,5 vezes.

Quanto à evolução da capacidade, em ambos os casos (camadas coladas vs. descoladas) ela é semelhante.

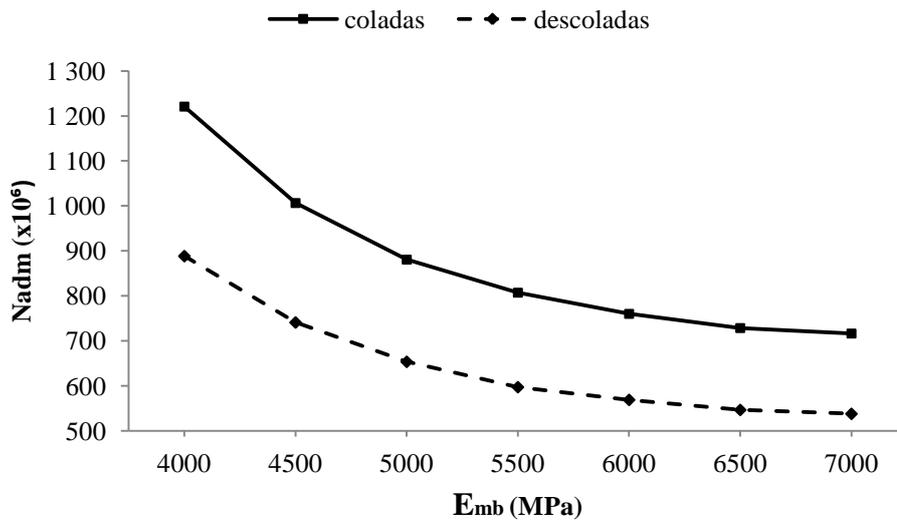


Figura 20 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, segundo o critério de fadiga da camada betuminosa ($e_{mb} = 12 \text{ cm}$)

Da análise deste gráfico (Figura 20) observa-se uma diminuição do N_{adm} na base das camadas betuminosas com o aumento do módulo de deformabilidade destas mesmas camadas. A diminuição é da ordem dos 50% o que merece estudo mais aprofundado no futuro, variando por exemplo a espessura das camadas betuminosas para verificar se este comportamento se mantém.

Ambas as estruturas têm o mesmo comportamento, sendo que a que apresenta melhor desempenho, para o critério de fadiga das camadas betuminosas, é a que se consideram todas as camadas coladas.

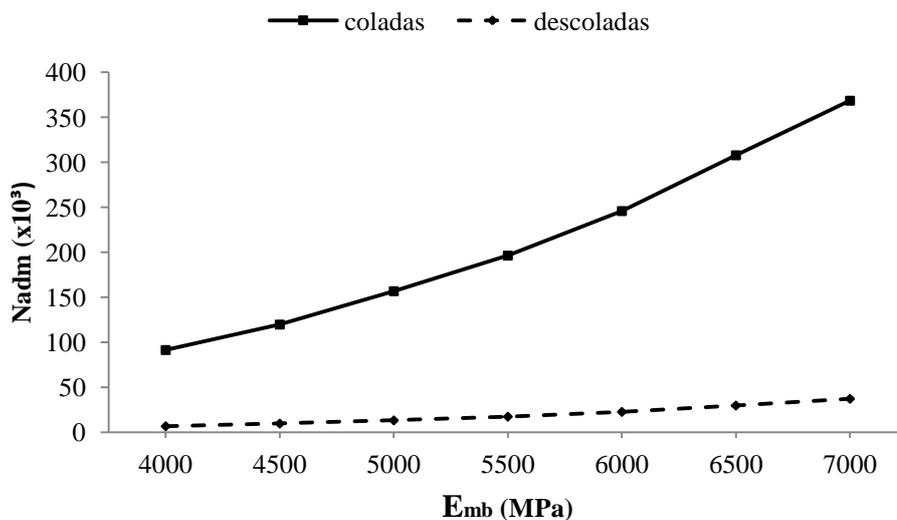


Figura 21 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, segundo o critério de fadiga da camada de solo-cimento

Da Figura 21, observa-se que o comportamento dos dois tipos de estruturas é semelhante, o número de eixos padrão admissível é crescente com o aumento do módulo de deformabilidade, sendo a diferença entre as duas estruturas grande. Na base da camada de solo-cimento, é vantajosa a estrutura com o interface solo-cimento/fundação colado.

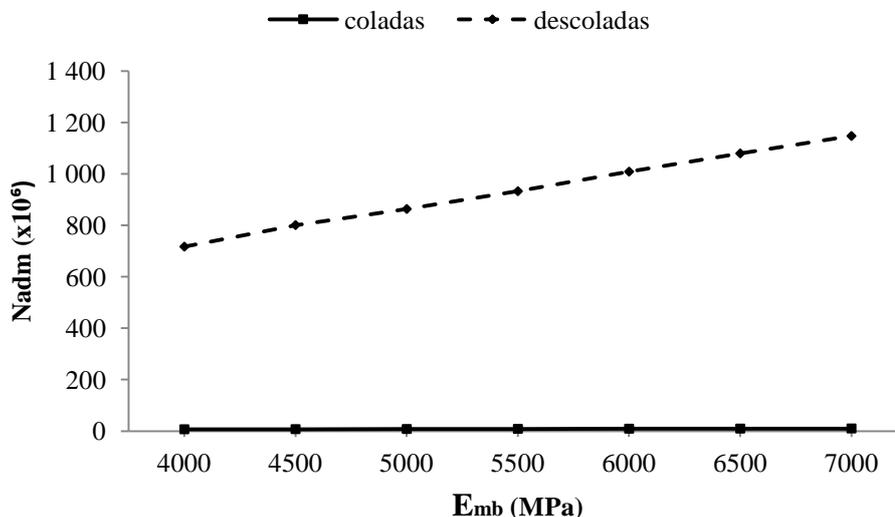


Figura 22 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, segundo o critério de deformação permanente

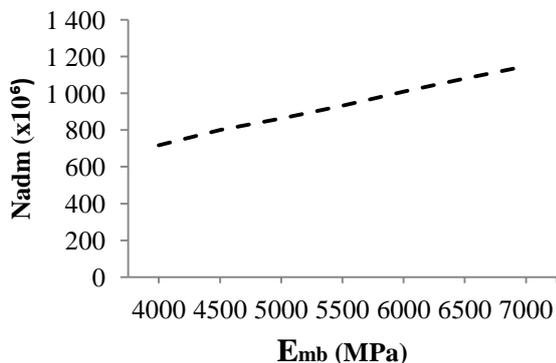


Figura 23 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação descolada

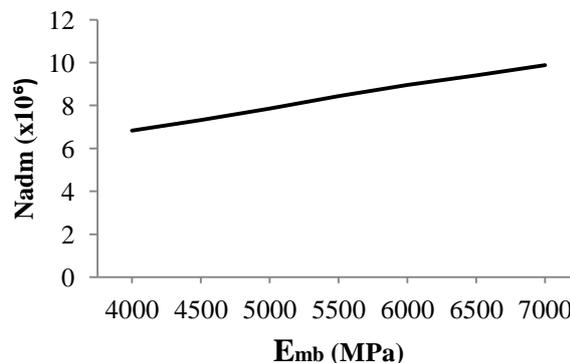


Figura 24 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada

Na Figura 23 e Figura 24 observa-se separadamente a evolução do N_{adm} considerando respectivamente descolagem e colagem no interface solo-cimento e fundação, onde se pode observar que o comportamento é semelhante.

Na Figura 22 é perceptível a diferença de grandeza do número de eixos padrão admissíveis entre estes dois tipos de estrutura, sendo mais favorável a que considera descolagem entre as duas últimas camadas.

Concluindo a secção 3.3, a influência das camadas betuminosas tem maior relevo quando varia a espessura das mesmas do que quando varia o módulo de deformabilidade e o critério que mais beneficia é o de fadiga na base da camada de solo-cimento e a diferença entre colagem ou descolagem no

interface solo-cimento/fundação é mais evidente na base da camada de solo-cimento e no topo do solo de fundação, não sendo tão evidente na base das camadas betuminosas. Este fato justifica-se porque os pontos em análise que mais influência sofrem se encontrarem mais perto do interface em que varia a colagem entre as camadas.

3.4. INFLUÊNCIA DA CAMADA DE SOLO-CIMENTO NA RESPOSTA ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Tal como na secção anterior, nesta também será feita uma análise com o intuito de verificar a evolução da extensão na base das camadas betuminosas e tensão na base da camada de solo-cimento assim como a extensão no topo do solo de fundação, desta feita, em função da espessura e das características mecânicas da camada de solo-cimento.

3.4.1 Influência da espessura da camada de solo-cimento

O método de análise seguido é semelhante ao da secção anterior. Nesta a espessura da camada de solo-cimento varia entre 10 e 30 cm, valores que se revelaram os mais adequados para o intervalo de eixos padrão considerados.

Tabela 18 - N_{adm} em função da espessura da camada de solo-cimento: interface entre solo-cimento e fundação descolada

| e_{sc} [cm] | ϵ_t (10^{-6}) | N_{adm} (na base das camadas betuminosas) | σ_{sc} [kPa] | N_{adm} (na base da camada de solo-cimento) | ϵ_{dp} (10^{-6}) | N_{adm} (no topo do solo de fundação) |
|------------------|----------------------------|---|---------------------|---|-------------------------------|---|
| 10 | 106 | 39 247 400 | 696 | 0 | 184 | 91 583 815 |
| 12 | 88,9 | 94 586 993 | 629 | 2 | 164 | 145 115 776 |
| 14 | 76,7 | 197 862 459 | 575 | 19 | 147 | 224 812 617 |
| 16 | 68 | 361 239 854 | 526 | 168 | 133 | 335 492 995 |
| 18 | 61,5 | 596 986 682 | 483 | 1 165 | 121 | 489 720 787 |
| 20 | 56,8 | 888 379 530 | 444 | 6 732 | 110 | 717 000 205 |
| 22 | 53,3 | 1 220 967 704 | 409 | 32 488 | 101 | 1 008 798 726 |
| 24 | 50,7 | 1 567 835 252 | 378 | 130 975 | 92,3 | 1 446 382 692 |
| 26 | 49 | 1 859 344 321 | 351 | 441 094 | 85,1 | 2 001 574 595 |
| 28 | 48,3 | 1 998 041 792 | 326 | 1 357 727 | 78,6 | 2 750 425 186 |
| 30 | 47,8 | 2 104 751 069 | 303 | 3 819 718 | 72,9 | 3 716 891 700 |

Tabela 19 - N_{adm} em função da espessura da camada de solo-cimento: interface entre solo-cimento e fundação colada

| e_{sc} [cm] | ϵ_t (10^{-6}) | N_{adm} (na base das camadas betuminosas) | σ_{sc} [kPa] | N_{adm} (na base da camada de solo-cimento) | ϵ_{dp} (10^{-6}) | N_{adm} (no topo do solo de fundação) |
|---------------|----------------------------|---|---------------------|---|-------------------------------|---|
| 10 | 94,2 | 70 808 551 | 603 | 5 | 574 | 967 036 |
| 12 | 79,8 | 162 302 708 | 543 | 78 | 512 | 1 527 602 |
| 14 | 69,7 | 319 283 394 | 497 | 621 | 460 | 2 344 546 |
| 16 | 62,4 | 555 158 858 | 456 | 3 924 | 416 | 3 505 231 |
| 18 | 57,1 | 865 286 007 | 419 | 20 721 | 382 | 4 929 883 |
| 20 | 53,3 | 1 220 967 704 | 386 | 91 398 | 352 | 6 837 847 |
| 22 | 50,5 | 1 599 128 381 | 357 | 336 778 | 326 | 9 294 363 |
| 24 | 48,9 | 1 878 433 938 | 330 | 1 134 194 | 302 | 12 620 084 |
| 26 | 48,1 | 2 039 928 004 | 306 | 3 337 625 | 280 | 17 078 821 |
| 28 | 47,6 | 2 149 341 668 | 285 | 8 582 104 | 261 | 22 621 843 |
| 30 | 47,2 | 2 241 972 228 | 265 | 21 096 905 | 243 | 30 106 823 |

Através da análise da Tabela 18 e Tabela 19, mais uma vez o critério condicionante é o de fadiga da camada de solo-cimento. Por exemplo, para um tráfego de 2×10^6 eixos padrão, e considerando todas as camadas coladas, a espessura da camada de solo-cimento deverá ser de 30 cm, enquanto que se for considerada a descolagem no interface solo-cimento/fundação, 26 cm são suficientes.

É evidente o aumento considerável do N_{adm} quando a espessura passa dos 26 para os 28 cm na Tabela 18 e dos 22 para os 24 cm na Tabela 19.

Se forem comparados os valores duplicando a espessura, por exemplo de 14 para 28 cm, a resposta é similar nas duas estruturas em relação à base das camadas betuminosas, no topo do solo de fundação o aumento é de cerca de 10 vezes enquanto que na base da camada de solo-cimento o aumento é de cerca de 70000 vezes e 14000 vezes (consoante se considere descolagem ou colagem entre as duas últimas camadas). Quer isso dizer que a variação da espessura da camada de solo-cimento tem maior preponderância em relação à fadiga na base da camada de solo-cimento.

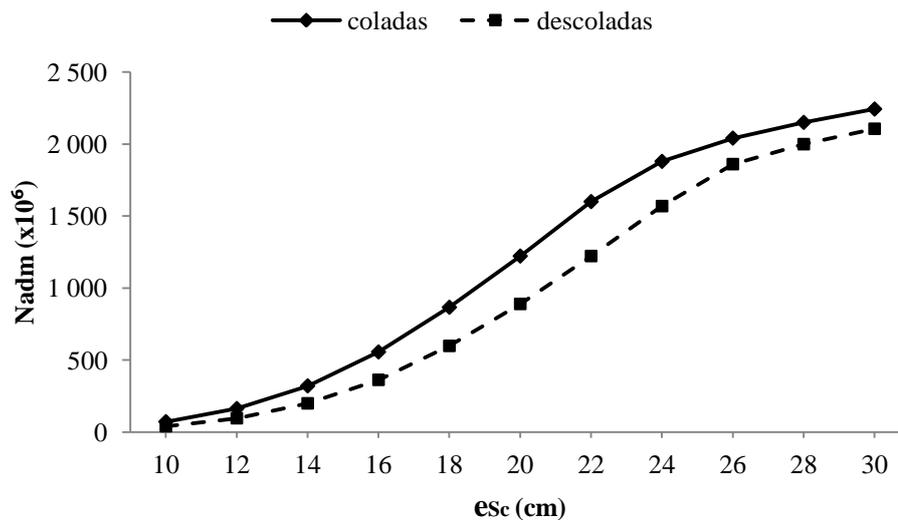


Figura 25 – Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de fadiga da camada betuminosa

Da Figura 25 observa-se comportamento semelhante das duas estruturas em análise, o aumento do N_{adm} é constante e entre os 16 e 22 cm o crescimento é mais acentuado. Neste critério, uma vez mais, é vantajoso optar colagem entre todas as camadas.

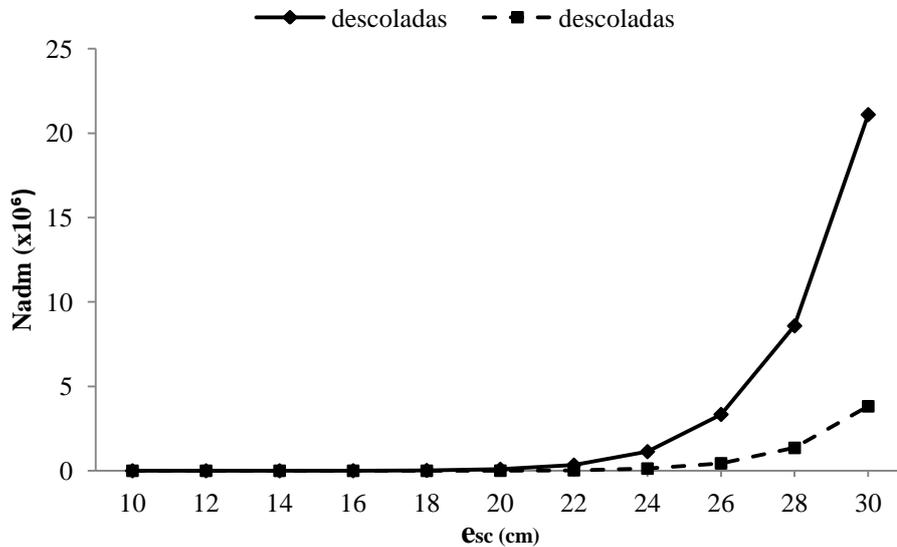


Figura 26 - Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de fadiga da camada de solo-cimento

Da Figura 26 também se observa comportamento semelhante das duas estruturas, sendo também mais vantajoso considerar colagem entre todas as camadas. A partir dos 24 cm o crescimento é mais acentuado. Para 30 cm de espessura da camada de solo-cimento, a diferença entre as duas estruturas é notória.

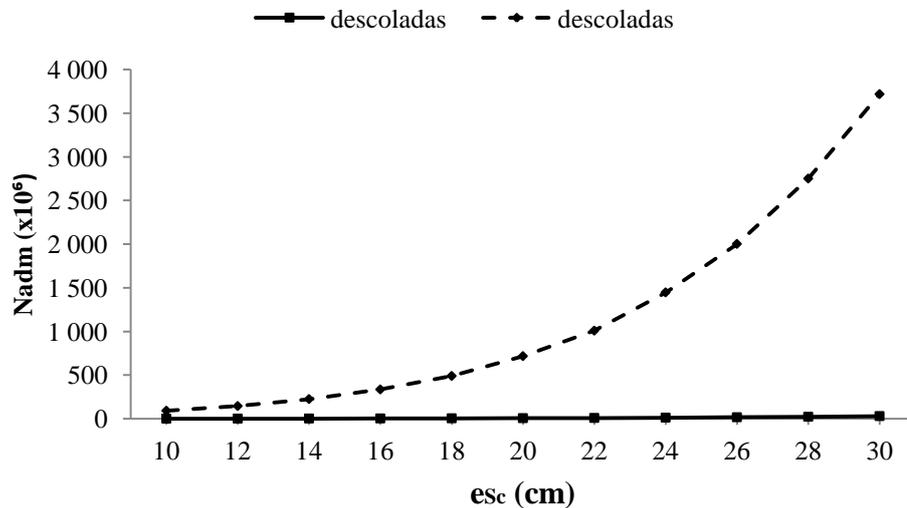


Figura 27 - Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente

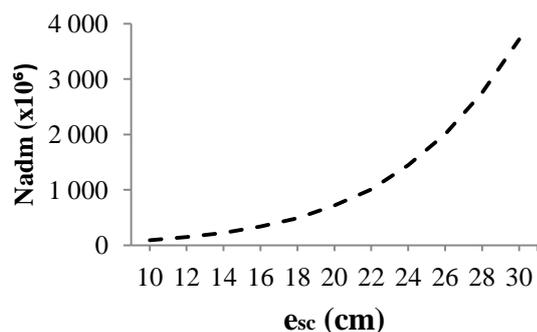


Figura 28 - Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação descolada

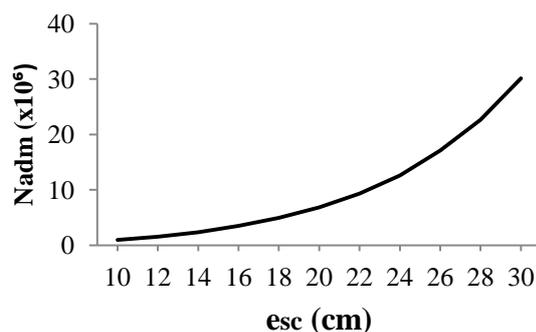


Figura 29 - Evolução do N_{adm} em função da espessura da camada de solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada

A comparação da Figura 28 com a Figura 29 permite afirmar que ambas as estruturas têm o mesmo comportamento para o critério em análise, são ambas crescentes e o crescimento aumenta com o aumento da espessura das camadas (como se pode concluir pelo aumento da inclinação das curvas com o aumento da espessura da camada).

A Figura 27 demonstra a diferença de grandeza entre as duas estruturas em análise, considerando descolagem no interface solo-cimento/fundação é favorável para a diminuição da extensão no topo do solo de fundação.

Concluindo esta secção, todos os critérios de ruína em análise beneficiam com o aumento da espessura da camada de solo-cimento e a descolagem entre o solo-cimento e a fundação apenas tem vantagem no que á deformação permanente, no topo do solo de fundação, diz respeito.

3.4.2 Influência das características mecânicas da camada de solo-cimento

Este é o último parâmetro analisado. O intervalo de valores do módulo de deformabilidade do solo-cimento em análise varia entre os 500 e os 3500 MPa, visto ser este o intervalo que a análise dos valores obtidos revelou ser suficiente.

Tabela 20 - N_{adm} em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento: interface entre solo-cimento e fundação descolada

| Esc [MPa] | $\epsilon_t (10^{-6})$ | N_{adm} (na base das camadas betuminosas) | σ_{Sc} [kPa] | N_{adm} (na base da camada de solo-cimento) | $\epsilon_{dp} (10^{-6})$ | N_{adm} (no topo do solo de fundação) |
|-----------|------------------------|---|---------------------|---|---------------------------|---|
| 500 | 201 | 1 600 884 | 222 | 145 902 422* | 179 | 102 253 433 |
| 1000 | 122 | 19 433 054 | 326 | 1 357 727* | 142 | 258 188 350 |
| 1500 | 81,4 | 146 966 448 | 393 | 66 714* | 122 | 473 860 707 |
| 2000 | 56,8 | 888 379 530 | 444 | 6 732* | 110 | 717 000 205 |
| 2500 | 40,3 | 4 941 001 560 | 486 | 1 018* | 101 | 1 008 798 726 |
| 3000 | 30,9 | 18 644 374 793 | 522 | 202* | 94,9 | 1 294 270 852 |
| 3500 | 23,9 | 67 352 034 196 | 555 | 46* | 89,9 | 1 607 130 908 |

Tabela 21 - N_{adm} em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento: interface entre solo-cimento e fundação colada

| Esc [MPa] | ϵ_t (10^{-6}) | Nadm (na base das camadas betuminosas) | σ_{Sc} [kPa] | Nadm (na base da camada de solo-cimento) | ϵ_{dp} (10^{-6}) | Nadm (no topo do solo de fundação) |
|------------------|---|---|---------------------------------------|---|--|---|
| 500 | 185 | 2 423 715 | 155 | 2 969 314 848* | 589 | 872 226 |
| 1000 | 113 | 28 506 770 | 262 | 24 144 182* | 469 | 2 169 695 |
| 1500 | 76,2 | 204 439 761 | 332 | 1 036 633* | 399 | 4 141 889 |
| 2000 | 53,3 | 1 220 967 704 | 386 | 91 398* | 352 | 6 837 847 |
| 2500 | 39 | 5 821 262 542 | 430 | 12 635* | 320 | 10 011 292 |
| 3000 | 29,9 | 21 977 803 197 | 468 | 2 288* | 295 | 13 861 236 |
| 3500 | 23,2 | 78 144 838 380 | 502 | 496* | 276 | 18 090 630 |

A análise da Tabela 20 e

Tabela 21 demonstra que a grande diferença de considerar todas as camadas coladas e descolagem entre o solo-cimento e a fundação é mais acentuada no topo do solo de fundação, há uma grande diminuição em considerar todas as camadas coladas.

Se considerar todas as camadas coladas, o critério condicionante é na base das camadas betuminosas, quando o módulo de deformabilidade do solo-cimento for 500 MPa, mas para valores superiores é o critério de fadiga na base do solo-cimento o condicionante. Considerando descoladas as camadas inferiores, o critério que condiciona é por deformação permanente, até ao módulo de deformabilidade do solo-cimento igual a 1000 MPa e para valores superiores é o critério de fadiga da camada de solo-cimento que condiciona.

Se a análise for feita para a classe de tráfego T5, apenas considerando o módulo de deformabilidade da camada de solo-cimento igual a 1000 MPa e todas as camadas coladas ou módulo de 500 MPa e descolagem entre o solo-cimento e fundação, seria possível uma estrutura bem dimensionada.

O comportamento da estrutura na base da camada de solo-cimento (*), não é o esperado. Seria necessários mais estudos para perceber este comportamento, experimentando, por exemplo, a evolução do número de eixos padrão admissível em função do módulo de deformabilidade da camada de solo-cimento, para outras espessuras desta camada.

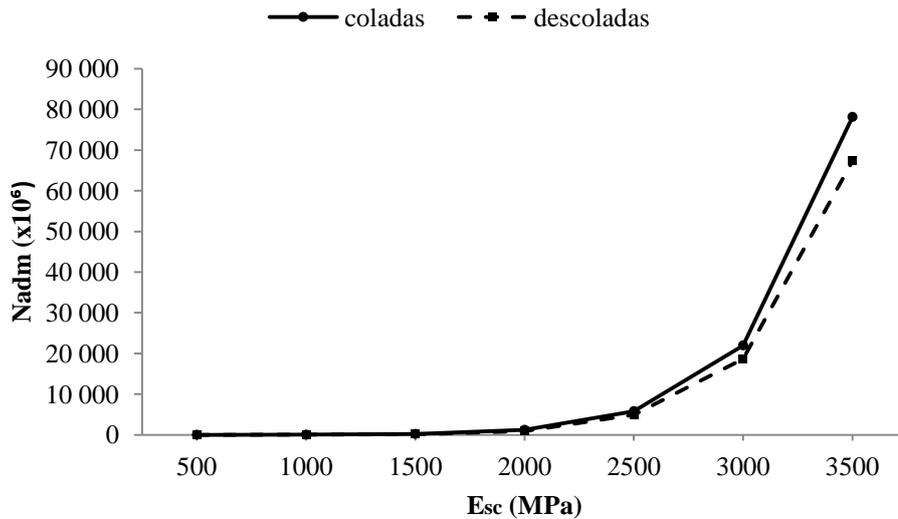


Figura 30 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento, segundo o critério de fadiga da camada betuminosa

Na Figura 30 observa-se comportamento semelhante de ambas as estruturas e o número de eixos padrão admissíveis sofre um aumento mais acentuado para valores do módulo de deformabilidade da camada de solo-cimento superiores a 2000 MPa. A diferença do número de eixos padrão admissíveis entre as duas estruturas não é considerável.

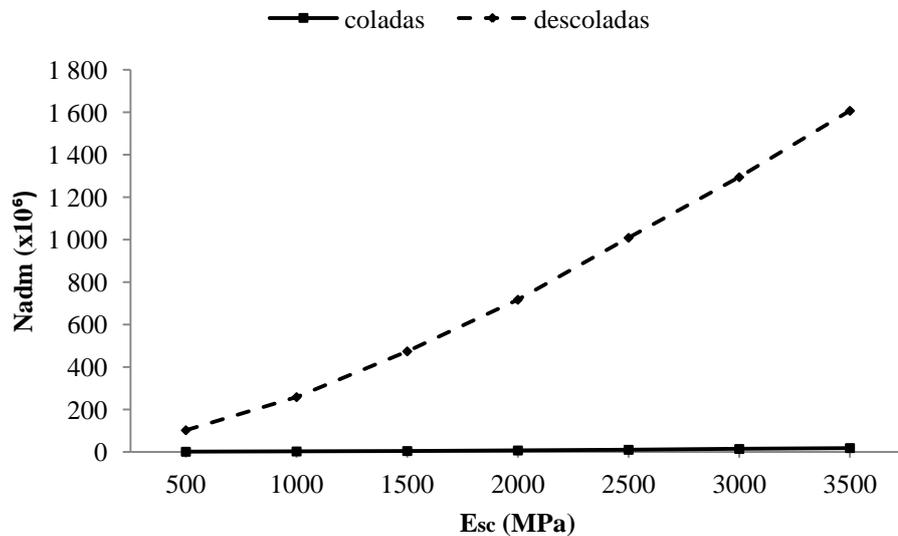


Figura 31 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento segundo o critério de deformação permanente

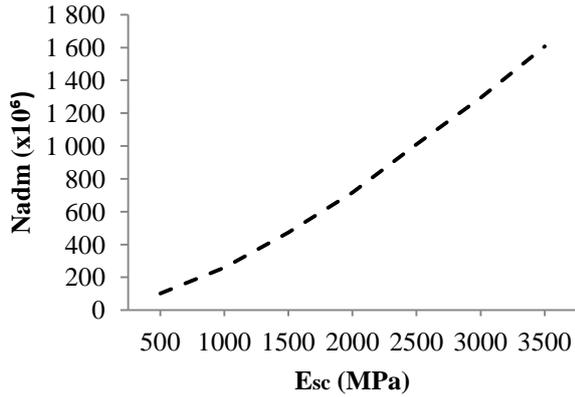


Figura 32 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada

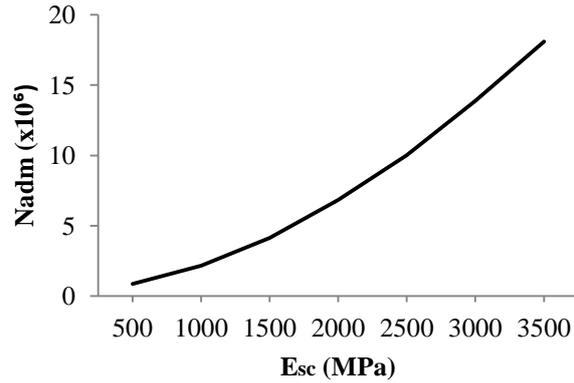


Figura 33 - Evolução do N_{adm} em função do módulo de deformabilidade do solo-cimento, segundo o critério de deformação permanente: interface entre solo-cimento e fundação colada

A Figura 32 e a Figura 33 permitem verificar o comportamento semelhante das duas estruturas, e a Figura 31 a diferença de grandeza do N_{adm} das duas (cerca de 100 vezes).

Esta subsecção é de interesse maior visto que, este parâmetro (módulo de deformabilidade da camada de solo-cimento) é o único relacionado com as características mecânicas do material em estudo nesta tese, o solo-cimento.

Há que referir que atualmente não existem expressões que relacionem o teor de cimento do material solo-cimento com a resistência do mesmo. Por isso, neste estudo foi adotado o valor de 2000 MPa para módulo de deformabilidade do solo-cimento (baseado no MACOPAV), no entanto, tem-se consciência de que a definição deste valor deveria ter sido alvo de estudo mais aprofundado, dado que é expectável que as características do material variem com o aumento do teor de cimento.

Na análise das secções 3.3 e 3.4 é notório que a principal diferença entre descolagem ou colagem no interface solo-cimento/fundação diz respeito, como seria de esperar, à deformação permanente no topo do solo de fundação visto ser este o ponto de análise que mais próximo está do interface em que as condições de colagem variam.

De todas as análises feitas (nas secções 3.3.1 a 3.4.2), duas fogem do esperado, a influência do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas no número de eixos padrão admissíveis na base das camadas betuminosas e a influência do módulo de deformabilidade do solo-cimento no número de eixos padrão admissíveis na base da camada de solo-cimento. Ao contrário dos outros parâmetros que evoluem favoravelmente com a melhoria das características mecânicas das camadas em estudo, nestes o comportamento não corresponde ao previsto. Nestes casos o estudo deveria centrar-se em variar a espessura base das camadas (na camada betuminosa a espessura “base” é de 12 cm e na camada de solo-cimento é de 20 cm), estudar os pontos em que o *software* considerou a aplicação de carga, etc.

Em relação aos outros parâmetros em análise, a evolução é a esperada, a capacidade dos pavimentos aumenta com o aumento da espessura das camadas e com o aumento do módulo de deformabilidade dos materiais.

4

CASO DE ESTUDO: “SUBCONCESSÃO DO PINHAL INTERIOR: IC3 – LANÇO TOMAR/AVELAR SUL”

Neste capítulo final descreve-se o caso de estudo, que consiste num troço de uma futura via de comunicação com perfil de autoestrada com cerca de 9 km. Tem todo o interesse para esta dissertação, a análise desta infra-estrutura rodoviária, visto estar a ser executada com solo-cimento.

Esta obra foi adjudicada pela Estradas de Portugal (EP) à Ascendi que, por sua vez, nomeou o “Pinhal Interior ACE” (Agrupamento Complementar de Empresas), para a sua execução. Deste ACE, do qual a empresa MonteAdriano Engenharia e Construção S.A. faz parte, ficou definido que a esta empresa corresponderia entre outros trabalhos, à execução do lote 1, objeto de análise nesta tese.

4.1. DESCRIÇÃO GERAL DO CASO DE ESTUDO

O caso de estudo refere-se a um troço de 8,950 km do “lote 1” da “Subconcessão do Pinhal Interior: IC3 – Tomar/Avelar Sul”, cuja origem corresponde ao final do lanço do IC3, denominado “Variante de Tomar”; o troço em estudo termina “Viaduto da Ribeira da Figueira”, ao km 8+950 (Figura 34). Trata-se de uma estrada com perfil transversal tipo com duas faixas de rodagem e duas vias de tráfego por sentido de circulação, existindo um separador central do tipo New-Jersey. Na Figura 35, estão representados os perfis tipo, em reta ou curva com raio superior a 5000 m e em curva com raio inferior a 5000 m.

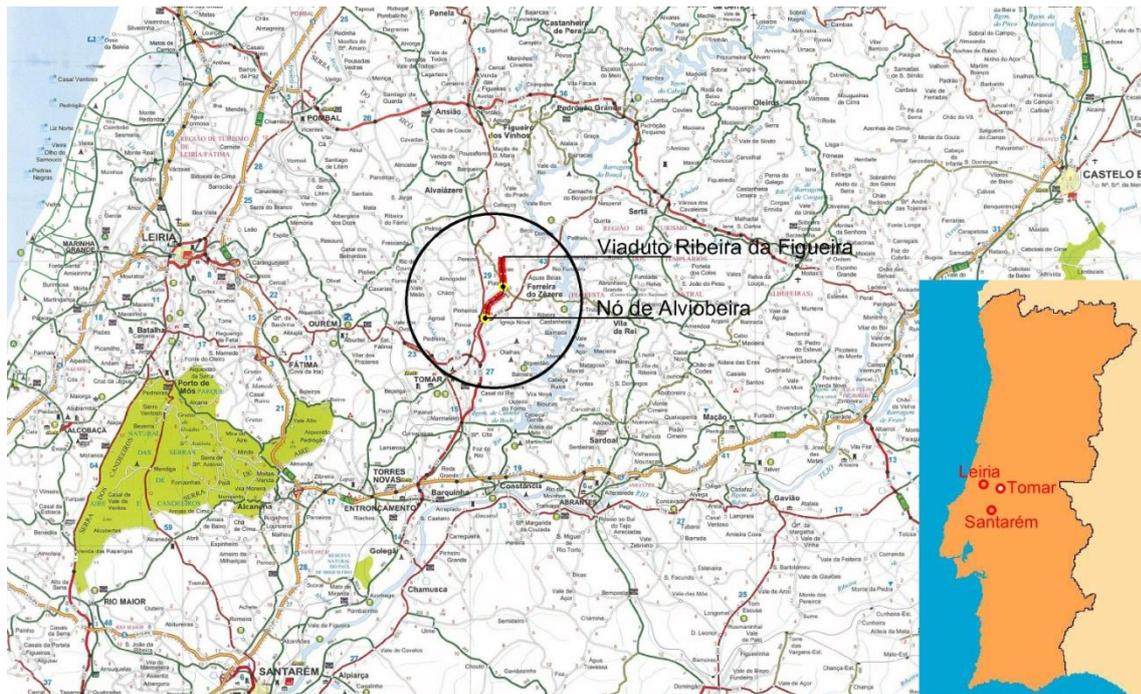


Figura 34 - Mapa de Enquadramento da Obra

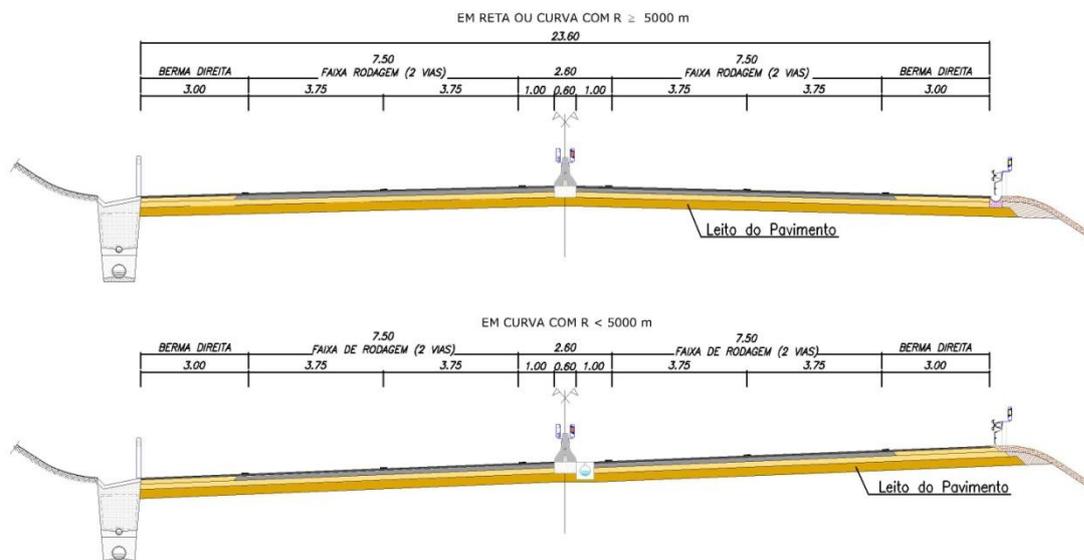


Figura 35 - Perfil Transversal Tipo

Pela análise do projeto, constata-se que o traçado do troço em estudo foi projetado com características geométricas compatíveis com uma velocidade base de 120 km/h e, devido à orografia do terreno, houve necessidade de recorrer a traineis com inclinações da ordem de 5%, superiores ao exigido para a velocidade base de 120 km/h.

Na presente dissertação será analisada a aplicação do solo-cimento no pavimento de um troço do lote 1, referido, que se localiza em plena via. Neste capítulo discute-se ainda as opções de dimensionamento, descrevem-se processos construtivos e apresenta-se um estudo económico comparativo entre a estrutura flexível inicial (sem solo-cimento) e a estrutura flexível com solo-cimento.

4.1.1 HIPÓTESES DE DIMENSIONAMENTO

Em projeto, a estrutura de pavimento foi definida tendo em conta os elementos relativos ao tráfego de veículos pesados, para a vida útil da estrada de 20 anos, e os elementos do estudo geológico e geotécnico.

A avaliação da capacidade de carga do pavimento foi feita através de um método empírico-mecanicista, que tem por base a análise estrutural do pavimento e que recorre ao cálculo dos estados de tensão e de deformação induzidos na estrutura do pavimento e na respectiva fundação quando esta é solicitada pelos eixos dos veículos.

Os estados de tensão e deformação nas várias camadas constituintes do pavimento foram determinados admitindo-se um modelo de comportamento no qual o pavimento é assimilado a um conjunto de camadas sobrepostas assentes sobre a fundação. Relativamente aos materiais constituintes das camadas, foi considerado que têm comportamento elástico linear e isotrópico. A ação dos eixos dos veículos pesados, durante o período de vida útil de projeto é representada em termos de um número equivalente de passagens de um eixo simples padrão de 130 kN, que considera, por definição, rodado duplo e área de contacto pneu-pavimento, circular.

Para verificar-se o dimensionamento do pavimento foram utilizados critérios que consideram os seguintes estados limites de ruína do pavimento:

- fendilhamento excessivo à superfície do pavimento, resultante da rotura por fadiga, em tração, das camadas betuminosas, tendo-se limitado a extensão máxima de tração na zona inferior das camadas betuminosas;
- fendilhamento excessivo à superfície do pavimento, resultante da rotura por fadiga, em tração, da camada de solo-cimento, tendo-se limitado a tensão máxima de tração na zona inferior dessa camada;
- deformação excessiva (cavados de rodeira) à superfície da camada de desgaste, tendo-se limitado a extensão vertical de compressão no topo da fundação do pavimento.

Como referido anteriormente, as extensões são limitadas em função do número de passagens do eixo padrão de 130 kN acumuladas durante os 20 anos de vida do projeto.

No dimensionamento dos pavimentos, considerou-se o tráfego médio diário anual de veículos pesados em 2012, o ano de abertura, sendo o período útil de vida de 20 anos. Como a via é constituída por duas faixas de rodagem com duas vias de tráfego por sentido de circulação, o projetista adotou que 90% dos pesados se concentram na via da direita. De acordo com as classes de tráfego do “Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional” (JAE, 1995) e com os dados previstos para este lanço, foi possível construir a Tabela 22:

Tabela 22 - Número acumulado de Eixos Padrão

| Lote 1 | Anos | | | NVP | α | N_{130}^{dim} |
|----------------|------|------|------|-----|----------|--------------------|
| | 2012 | 2022 | 2032 | | | |
| Projeto | 280 | 489 | 796 | 126 | 0,5 | $0,81 \times 10^6$ |
| Tese | | | | | 0,6 | $0,74 \times 10^6$ |

De acordo com as indicações do projeto, os solos de fundação predominantes ao longo do traçado caracterizam-se como sendo “Grés de Silves” e formações xistosas, mais frequentes até ao nó de Pias (Tabela 23).

Tabela 23 - Características Geológicas do terreno de Fundação

| | Classificação ASTM | CBR_{95%} |
|---------------------------|---|--------------------------|
| Grés de Silves | CL(7); ML(3); ML(1); SC(23); SC-SM(7); SW-SC(1); SM(9); SW-SM(3); GP-GC(1); SP- SM(1). | 11 a 38% |
| Formações xistosas | CL(1); ML(2); SC(3); SM(9); SW(9); SW-SM(2) | 9 a 20% |

De acordo com a Memória Descritiva do projeto, a utilização do solo-cimento surge devido à heterogeneidade dos terrenos, sendo proposta que a camada inferior (em aterro ou escavação), seja feita em solo-cimento, fabricado *in-situ*, com 0,25 m de espessura. Com a utilização do solo-cimento é possível homogeneizar as características mecânicas do pavimento. Este material deve ser feito a partir de solos apropriados, com teores de cimento a definir após realização de um estudo laboratorial específico. O estudo laboratorial estabelecerá a dosagem de cimento para que satisfaça os critérios de resistência mínima previstos no dimensionamento dos pavimentos.

Como referido no capítulo 2, a resistência à tração em compressão diametral preconizada nas normas é de 0,640 MPa, aos 28 dias em misturas com cimento do tipo I ou aos 90 dias com cimento do tipo II. Para efeitos de dimensionamento, admitiu-se para esta camada, um módulo de deformabilidade (E) de 2000 MPa e um coeficiente de Poisson (ν) de 0,25.

Os ensaios de laboratório realizados *in situ* permitiram identificar as características do solo a tratar com cimento, indicadas na Tabela 24:

Tabela 24 - Características do solo a tratar com cimento

| Propriedade | Método | Valor obtido |
|---|---------------|---------------------|
| Dimensão máxima | LNEC E 239 | 76 mm |
| % Passados no peneiro 75 μm, max. | LNEC E 239 | 14 |
| Índice de Plasticidade, max. | NP 143 | 12 |
| Classificação Rodoviária | LNEC E 240 | A-2-6 (0) |
| Classificação Unificada | ASTM D 2847 | GC |
| Equivalente de Areia | LNEC E 199 | 21 |
| Valor de azul-de-metileno | NF P 18-592 | 1,96 g/kg |
| Conteúdo em matéria orgânica | NLT 117 | 0% |
| Teor em Sulfatos | NP 2106 | 0,02% |

Os ensaios de compressão simples foram realizados segundo o preconizado na Norma Europeia EN 13286-41:2003 “*Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 41: Test methods for the determinations of the compressive strength of the hydraulically mixtures*” (CEN, 2003a) enquanto os ensaios compressão diametral seguiram a Norma Europeia EN 13286-42:2003 “*Unbound and hydraulic bound mixtures – Part 42: Test methods for the determination of the indirect tensile strength of the mixtures*.”(CEN, 2003b).

É interessante avaliar os resultados obtidos, referentes a estes dois ensaios para os vários tipos de cimento, percentagem de cimento e idade, indicados na Tabela 25. Os resultados consideram as médias obtidas nos 3 provetes ensaiados de cada tipo de mistura.

Tabela 25 - Resistência Média dos provetes de solo-cimento, ensaios de laboratório

| Tipo de Ensaio | Percentagem de cimento | Idade (dias) | | |
|----------------------|------------------------|--------------|----------|----------|
| | | 7 | 28 | 90 |
| Compressão diametral | 3,5% (CEM II 32,5N) | 2,1 MPa | 2,4 MPa | 3,1 MPa |
| | 4,0% (CEM II 32,5N) | 2,3 MPa | 3,0 MPa | 3,9 MPa |
| | 4,5% (CEM II 32,5N) | 2,2 MPa | 3,4 MPa | 4,7 MPa |
| | 3,5% (CEM II 42,5N) | 3,2 MPa | 4,2 MPa | 4,9 MPa |
| Tração Indireta | 3,5% (CEM II 32,5N) | 0,19 MPa | 0,26 MPa | 0,32 MPa |
| | 4,0% (CEM II 32,5N) | 0,26 MPa | 0,34 MPa | 0,37 MPa |
| | 4,5% (CEM II 32,5N) | 0,33 MPa | 0,37 MPa | 0,48 MPa |
| | 3,5% (CEM II 42,5N) | 0,34 MPa | 0,40 MPa | 0,53 MPa |

De interesse são também as seguintes figuras, onde se representam a variação da resistência à compressão (Figura 36) e a variação da resistência à tração indireta (Figura 37), em função da percentagem de cimento consoante a idade.

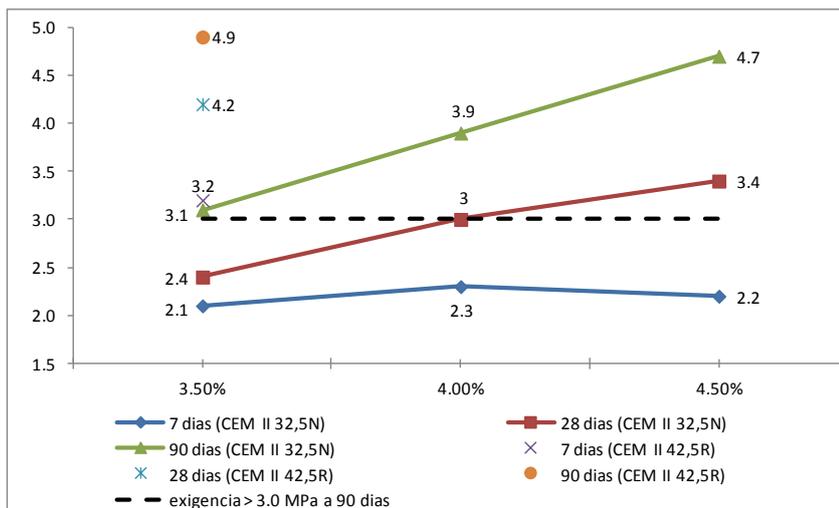


Figura 36 - Variação da Resistência à Compressão com a percentagem de cimento, aos 7, 28 e 90 dias

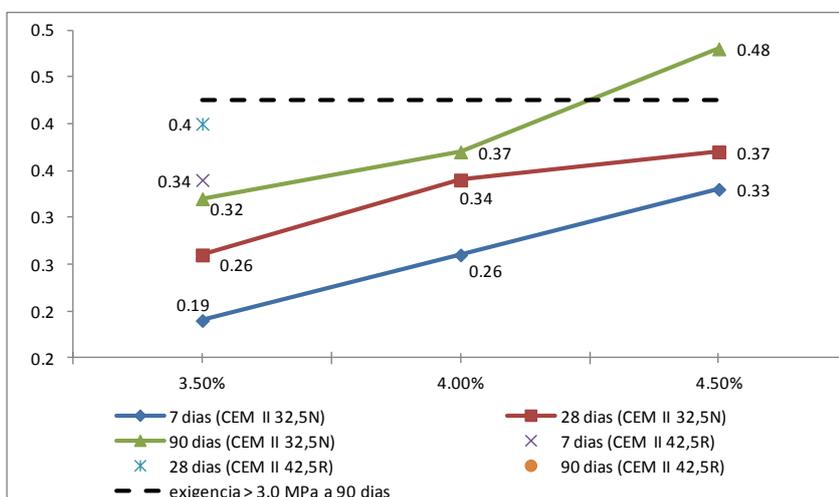


Figura 37 - Variação da Resistência à Tração Indireta com a percentagem de cimento, aos 7, 28 e 90 dias

Pela análise dos resultados fornecidos, no que se refere à compressão simples, todas as percentagens estudadas com os dois tipos de cimento (CEM II 32,5N e CEM II 42,5N) cumprem o valor mínimo exigido de 3,0 MPa para a resistência à compressão aos 90 dias de idade. Quanto à resistência à tração indireta, o valor mínimo exigido é de 0,425 MPa, aos 90 dias. Portanto, o recomendável é a utilização de 3,5% de cimento CEM II 42,5R, pois para esta percentagem, garante-se as resistências mínimas exigidas para os dois ensaios.

4.2. ESTRUTURA DO PAVIMENTO (ESTRUTURA FLEXÍVEL INICIAL VS ESTRUTURA FLEXÍVEL COM SOLO-CIMENTO)

A estrutura do pavimento preconizada para a plena via, entre o km 0+000 (variante de Tomar) e o km 8+950 (Viaduto da Ribeira da Figueira) é constituído por uma camada de desgaste em betão betuminoso (BB) com 5 cm, camada de ligação em macadame betuminoso (MB) de 6 cm e camada de base em agregado britado de granulometria extensa (ABGE) com 15 cm. Esta estrutura é assente numa camada em solo-cimento (Sc), com 25 cm de espessura.

Inicialmente, a estrutura de pavimento flexível prevista para este trecho de estrada compreendia duas camadas betuminosas com um total de 15 cm (5 de desgaste mais 10 de ligação), e duas camadas de ABGE com 15 cm cada (base e sub-base).

Ambas as estruturas, a inicial e a final, estão descritas na Tabela 26 e na Figura 38 e Figura 39.

Tabela 26 – Estruturas do pavimento em Plena Via

| Estrutura do Pavimento [cm] | | | | | |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----|
| Camada | AC14 surf 35/50 | AC20 bin 35/50 | ABGE _b | ABGE _{sb} | Sc |
| Estrutura Inicial | 5 | 10 | 15 | 15 | - |
| Estrutura Solo-cimento | 5 | 6 | 15 | - | 25 |

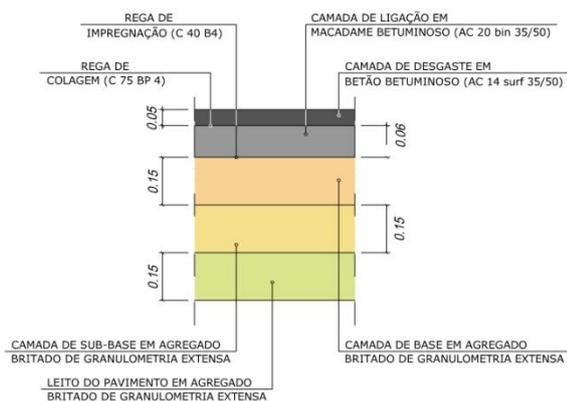


Figura 38 - Estrutura flexível inicial

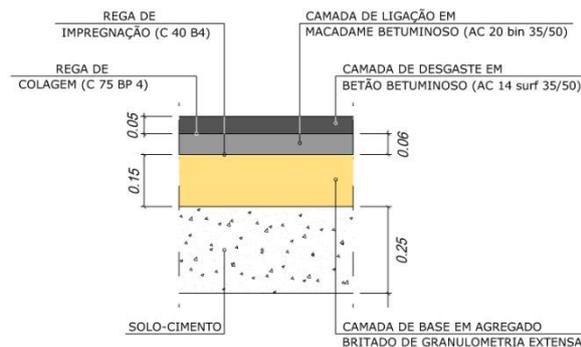


Figura 39 - Estrutura flexível com leito do pavimento em solo-cimento

Segundo a Memória Descritiva do projeto, a camada de agregado britado de granulometria extensa, existente entre as camadas betuminosas e o leito do pavimento (em solo-cimento), foi prevista com o intuito de evitar a propagação de fissuras da camada de solo-cimento para as camadas betuminosas subjacentes.

A berma terá espessura total igual à da faixa de rodagem, prolongando-se para a berma a camada de desgaste, sendo a restante espessura realizada em agregado britado de granulometria extensa.

Será dada uma rega sob a camada de solo-cimento, a fim de manter o teor de humidade e permitir a cura deste material.

Em relação às misturas betuminosas, e seguindo a Norma EN13108-1 (CEN, 2006), estas são designadas seguindo a nomenclatura indicada na Figura 40:

| AC | D | Surf/base/bin | ligante |
|----|---|---------------|---------|
|----|---|---------------|---------|

Figura 40 - Designação das misturas betuminosas

Onde:

| | |
|---------|---|
| AC | Betão betuminoso; |
| D | Dimensão correspondente à abertura do peneiro superior que pode reter material; |
| surf | Aplicação: camada de desgaste; |
| base | Aplicação: camada de base; |
| bin | Aplicação: camada de ligação; |
| ligante | Designação do ligante utilizado (em betumes de pavimentação, a gama de penetração deve ser selecionada entre 20/30 e 330/430 inclusive e no caso de betumes duros de pavimentação, entre 10/20 e 15/25) |

4.3. ANÁLISE ESTRUTURAL (ESTRUTURA FLEXÍVEL INICIAL VS ESTRUTURA FLEXÍVEL COM SOLO-CIMENTO)

A verificação estrutural será feita com base na metodologia já explanada no capítulo anterior e com base nos dados de tráfego para esta situação em concreto. Lembra-se que o dano relativo aos critérios de fadiga das camadas betuminosas e de solo-cimento e de deformação permanente têm que estar no intervalo [0,8-1,0]. Esta grandeza, o quociente entre o número de eixos padrão real (calculada através do programa de calculo Alize) e o número de eixos padrão admissível, calculada pelas equações (4.1 a 4.2), baseada nos critérios da Shell e já visto anteriormente.

Sendo:

$$\varepsilon_{t,adm} = k_t * N_{dim}^{-0,20} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{dp,adm} = k_s * N_{dim}^{-0,25} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{sc,adm} = (1 - 0,08 * \log(N_{dim})) * R_t \quad (4.3)$$

Em que:

$$k_t = 4,13 * 10^{-3};$$

$$k_s = 1,8 * 10^{-2};$$

$$R_t = 0,640 \text{ MPa.}$$

Lembra-se que a extensão radial de tração (ε_t) é avaliada na base das camadas betuminosas, a tensão horizontal de tensão na base da camada de solo-cimento (σ_{sc}) e a extensão vertical máxima de compressão (ε_{dp}), no topo do solo de fundação.

Na Tabela 27 indicam-se os valores das extensões calculados com o programa Alize para as duas estruturas:

Tabela 27 - Análise das estruturas flexíveis inicial (sem solo-cimento) e com solo-cimento

| Est | Características da camada | | | desig. | Z [cm] | ϵ_{xx} (10^{-6}) | Nadm (na base das camadas betuminosas) | σ_{xx} [kPa] | Nadm (na base da camada de solo-cimento) | ϵ_{zz} (10^{-6}) | Nadm (no topo do solo de fundação) |
|------------------------------------|---------------------------|----------|----------|-----------------|--------|----------------------------------|--|---------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| | E [MPa] | ν | e [cm] | | | | | | | | |
| Estrutura Inicial sem solo-cimento | 5300 | 0,40 | 5 | AC14 surf 35/50 | 0 | 171 | | 1760 | | 163 | |
| | | | | | 5 | 51,8 | | 715 | | 70,3 | |
| | 6400 | 0,40 | 10 | AC20 bin 35/50 | 5 | 51,8 | | 787 | | 70,7 | |
| | | | | | 15 | 163 | 10 442 686 | 1510 | | 190 | |
| | 280 | 0,35 | 15 | ABGEsb | 15 | 163 | | 8,86 | | 381 | |
| | | | | | 30 | 195 | | 47,5 | | 301 | |
| Estrutura com solo-cimento | 150 | 0,35 | 15 | ABGEb | 30 | 195 | | 11,6 | | 408 | |
| | | | | | 45 | 190 | | 21,7 | | 340 | |
| | 80 | 0,35 | infinita | Fundação | 45 | 190 | | 2,27 | | 474 | 2 079 585 |
| | 5300 | 0,40 | 5 | AC14 surf 35/50 | 0 | 161 | | 1730 | | 123 | |
| | | | | | 5 | 21,8 | | 485 | | 32,3 | |
| | 6400 | 0,40 | 6 | AC20 bin 35/50 | 5 | 21,8 | | 517 | | 33,3 | |
| Estrutura com solo-cimento | | | | | 11 | 147 | 17 505 059 | 1280 | | 189 | |
| | 320 | 0,35 | 15 | ABGEb | 11 | 147 | | 51,3 | | 554 | |
| | | | | | 26 | 13,3 | | 75,6 | | 231 | |
| | 2000 | 0,25 | 25 | Sc | 26 | 13,3 | | 80,3 | | 44,2 | |
| | | | | | 51 | 109 | | 273 | 14 722 066 | 74,2 | |
| 60 | 0,40 | infinita | Fundação | 51 | 109 | | 2,89 | | 286 | 15 690 106 | |

O incremento do N_{adm} associado às duas camadas possíveis de comparar (base das camadas betuminosas e topo do solo de fundação) entre as duas estruturas é significativo (superior a 140%) e está sintetizado na Tabela 28:

Tabela 28 – Comparativo entre estrutura inicial e estrutura com solo-cimento

| | Nadm (na base das camadas betuminosas) | Nadm (no topo do solo de fundação) |
|--|--|------------------------------------|
| Estrutura Inicial | 10 442 686 | 2 079 585 |
| Estrutura com leito do pavimento Solo-cimento | 17 505 059 | 15 690 106 |
| | 140% | 187% |

O critério de ruína condicionante em cada uma das estruturas é diferente, na estrutura flexível inicial é o critério de deformação permanente enquanto que na estrutura flexível com solo-cimento o critério de ruína que condiciona o dimensionamento é de fadiga da camada de solo-cimento.

De salientar que a diferença no número de eixos padrão admissível condicionante em cada estrutura e que condiciona o dimensionamento é cerca de 7 vezes superior para a estrutura flexível com solo-cimento.

Também se comparam os valores obtidos neste estudo, com o programa Alize, com os de projeto calculados, com o programa Bisar. Verifica-se que a diferença máxima é de cerca de 10%, como se pode ver na Tabela 29 :

Tabela 29 - Diferença Alize/Bisar

| Est | $\epsilon_{xx} (10^{-6})$ | | $\sigma_{xx} [kPa]$ | | $\epsilon_{zz} (10^{-6})$ | |
|---------------------|---------------------------|-------|---------------------|-------|---------------------------|-------|
| | Alize | Bisar | Alize | Bisar | Alize | Bisar |
| Inicial | 163 | 173 | - | - | 474 | 486 |
| Solo-cimento | 147 | 162 | 273 | 276 | 286 | 318 |
| % erro | 9,26% | | 1,09% | | 10,06% | |

Mediante os valores indicados na Tabela 27, avalia-se o dano, tanto por fadiga (das camadas betuminosas e da camada de solo-cimento) como por deformação permanente, Tabela 30:

Tabela 30 - Avaliação do dano

| Est. | Dano | | |
|--------------|-----------|-----------|----------------|
| | Fadiga MB | Fadiga Sc | def.permanente |
| Inicial | 14,09 | - | 2,81 |
| Solo-cimento | 23,62 | 19,87 | 21,17 |

Verifica-se que os valores obtidos, para as duas estruturas, se encontram acima do intervalo preconizado, o que significa que ambas as estruturas estão sobredimensionadas.

4.4. ESTRUTURA OTIMIZADA

Nesta secção da tese é feito o estudo para definir-se uma estrutura otimizada, ou seja, uma estrutura que cumpra cada um dos critérios em análise e se possível todos em conjunto.

Tendo por base a estrutura de projeto, e o estudo feito no capítulo 3, procedeu-se à análise de diversas estruturas, variando a espessura das camadas, como ilustrado na Figura 41.

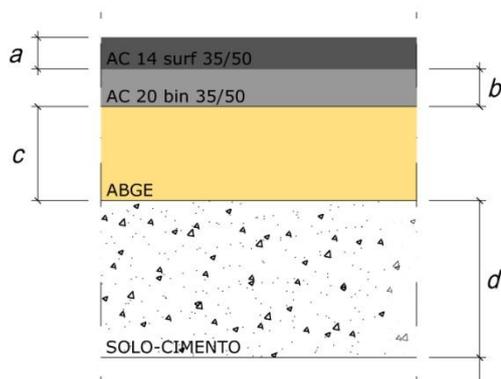


Figura 41- Estrutura otimizada

O estudo da estrutura otimizada, está compilado na Tabela 31, onde se pode observar a evolução do N_{adm} em função da espessura das camadas, para cada um dos critérios em análise.

Tabela 31 - Estudo da estrutura otimizada

| Espessura [cm] | | | | ϵ_{xx} (10^{-6}) | Nadm (na base das camadas betuminosas) | σ_{xx} [kPa] | Nadm (na base da camada de solo-cimento) | ϵ_{zz} (10^{-6}) | Nadm (no topo do solo de fundação) | Dano | | |
|----------------|----|----|------|-------------------------------|--|---------------------|--|-------------------------------|------------------------------------|-----------|-------------|----------------|
| a | b | c | d | | | | | | | Fadiga MB | Fadiga Sc | def.permanente |
| 5 | 6 | 15 | 25 | 147 | 17 505 059 | 273 | 14 722 066 | 286 | 15 690 106 | 23,62 | 19,87 | 21,17 |
| 5 | 6 | 5 | 30 | 112 | 68 180 494 | 288 | 7 498 942 | 287 | 15 472 569 | 92,01 | 10,12 | 20,88 |
| 5 | 6 | 5 | 26,5 | 115 | 59 739 428 | 325 | 1 420 181 | 326 | 9 294 363 | 80,62 | 1,92 | 12,54 |
| 5 | 6 | 5 | 15 | 139 | 23 156 678 | 492 | 777 | 511 | 1 539 595 | 31,25 | 0,00 | 2,08 |
| 5 | 6 | 5 | 10 | 162 | 10 768 995 | 581 | 14 | 626 | 683 585 | 14,53 | 0,00 | 0,92 |
| 5 | 6 | 4 | 26,5 | 109 | 78 094 018 | 331 | 1 084 317 | 330 | 8 851 854 | 105,39 | 1,46 | 11,95 |
| 5 | 6 | 3 | 26,5 | 101 | 114 325 574 | 336 | 865 964 | 333 | 8 537 153 | 154,29 | 1,17 | 11,52 |
| 5 | 6 | 2 | 30 | 87,1 | 239 695 281 | 299 | 4 572 527 | 293 | 14 243 592 | 323,48 | 6,17 | 19,22 |
| 5 | 6 | 2 | 15 | 117 | 54 805 097 | 531 | 135 | 535 | 1 281 371 | 73,96 | 0,00 | 1,73 |
| 5 | 6 | 2 | 27 | 89,7 | 206 913 127 | 334 | 947 464 | 328 | 9 069 736 | 279,23 | 1,28 | 12,24 |
| 5 | 6 | 2 | 26,5 | 90,2 | 201 241 511 | 340 | 723 394 | 334 | 8 435 370 | 271,58 | 0,98 | 11,38 |
| 5 | 6 | 1 | 30 | 72,3 | 608 217 304 | 299 | 4 572 527 | 292 | 14 439 715 | 820,81 | 6,17 | 19,49 |
| 5 | 6 | 1 | 50 | 68 | 826 429 278 | 158 | 2 594 552 721 | 155 | 181 870 905 | 1115,29 | 3501,42 | 245,44 |
| 5 | 6 | 1 | 25 | 76,8 | 449 722 026 | 361 | 281 332 | 352 | 6 837 847 | 606,91 | 0,38 | 9,23 |
| 5 | 6 | 1 | 15 | 102 | 108 830 193 | 542 | 82 | 537 | 1 262 388 | 146,87 | 0,00 | 1,70 |
| 5 | 6 | 1 | 27 | 74,7 | 516 591 492 | 334 | 947 464 | 326 | 9 294 363 | 697,15 | 1,28 | 12,54 |
| 5 | 6 | 1 | 26 | 75,7 | 483 360 170 | 347 | 528 027 | 339 | 7 948 611 | 652,31 | 0,71 | 10,73 |
| 5 | 6 | 1 | 26,5 | 75,1 | 502 979 834 | 341 | 691 582 | 332 | 8 640 476 | 678,79 | 0,93 | 11,66 |
| 5 | 6 | 0 | 10 | 107 | 85 670 513 | 691 | 0 | 704 | 427 365 | 115,61 | 0,00 | 0,58 |
| 5 | 6 | 10 | 15 | 153 | 14 331 548 | 427 | 14 460 | 459 | 2 365 044 | 19,34 | 0,02 | 3,19 |
| 5 | 5 | 3 | 26,5 | 104 | 98 760 564 | 354 | 385 423 | 348 | 7 157 693 | 133,28 | 0,52 | 9,66 |
| 5 | 10 | 15 | 25 | 115 | 59 739 428 | 222 | 145 902 422 | 237 | 33 273 358 | 80,62 | 196,90 | 44,90 |
| 6 | 5 | 10 | 30 | 133 | 28 873 009 | 261 | 25 254 789 | 265 | 21 286 611 | 38,96 | 34,08 | 28,73 |
| 3 | 5 | 10 | 15 | 178 | 6 724 349 | 524 | 184 | 548 | 1 164 040 | 9,07 | 0,00 | 1,57 |
| 3 | 5 | 10 | 30 | 178 | 6 724 349 | 524 | 184 | 548 | 1 164 040 | 9,07 | 0,00 | 1,57 |
| 3 | 5 | 4 | 26,5 | 121 | 46 325 851 | 390 | 76 351 | 384 | 4 827 976 | 62,52 | 0,10 | 6,52 |
| 1 | 2 | 15 | 10 | 179 | 6 538 605 | 748 | 0 | 787 | 273 647 | 8,82 | 0,00 | 0,37 |
| 1 | 2 | 20 | 5 | 193 | 4 487 079 | 785 | 0 | 871 | 182 397 | 6,06 | 0,00 | 0,25 |

Aplicação de solo-cimento em pavimentos flexíveis

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----|-----|-----|-----------|------|---------|------|-----------|-------------|------|-------------|
| 1 | 2 | 15 | 25 | 181 | 6 185 252 | 388 | 83 536 | 395 | 4 312 227 | 8,35 | 0,11 | 5,82 |
| 2 | 3 | 15 | 25 | 209 | 3 013 137 | 361 | 281 332 | 367 | 5 786 631 | 4,07 | 0,38 | 7,81 |
| 2 | 3 | 10 | 15 | 193 | 4 487 079 | 632 | 1 | 642 | 617 945 | 6,06 | 0,00 | 0,83 |
| 2 | 3 | 15 | 15 | 212 | 2 805 892 | 543 | 78 | 564 | 1 037 465 | 3,79 | 0,00 | 1,40 |
| 2 | 3 | 15 | 10 | 219 | 2 385 227 | 669 | 0 | 711 | 410 782 | 3,22 | 0,00 | 0,55 |
| 2 | 3 | 10 | 10 | 205 | 3 318 799 | 792 | 0 | 828 | 223 341 | 4,48 | 0,00 | 0,30 |
| 2 | 3 | 5 | 15 | 241 | 1 477 968 | 828 | 0 | 915 | 149 763 | 1,99 | 0,00 | 0,20 |
| 2 | 3 | 10 | 5 | 243 | 1 418 139 | 1010 | 0 | 1150 | 60 020 | 1,91 | 0,00 | 0,08 |
| 2 | 3 | 5 | 5 | 243 | 1 418 139 | 1290 | 0 | 1490 | 21 298 | 1,91 | 0,00 | 0,03 |
| 2 | 3 | 5 | 2 | 339 | 268 381 | 1580 | 0 | 1900 | 8 055 | 0,36 | 0,00 | 0,01 |
| 2 | 3 | 5 | 3 | 300 | 494 475 | 1460 | 0 | 1740 | 11 452 | 0,67 | 0,00 | 0,02 |
| 2 | 3 | 5 | 4 | 269 | 853 078 | 1370 | 0 | 1610 | 15 624 | 1,15 | 0,00 | 0,02 |
| 2 | 3 | 5 | 3,5 | 283 | 661 939 | 1410 | 0 | 1680 | 13 178 | 0,89 | 0,00 | 0,02 |

Da análise da tabela anterior pode concluir-se que, para obedecer a cada um dos critérios as espessuras das camadas deveriam ser, por exemplo, as indicadas na Tabela 32.

Tabela 32 - Avaliação do dano da estrutura otimizada

| Espessura [cm] | | | | Dano | | |
|----------------|---|----|------|-------------|-------------|----------------|
| a | b | c | d | Fadiga MB | Fadiga Sc | def.permanente |
| 5 | 6 | 1 | 26,5 | 678,79 | 0,93 | 11,66 |
| 2 | 3 | 10 | 15 | 6,06 | 0,00 | 0,83 |
| 2 | 3 | 5 | 3,5 | 0,89 | 0,00 | 0,02 |
| 5 | 6 | 15 | 25 | 23,62 | 19,87 | 21,17 |

Pela análise dos resultados, verifica-se que:

- para obedecer ao critério de fadiga da camada de solo-cimento, a camada deste material deve apresentar elevada espessura, superior a 25 cm;
- para obedecer ao critério de deformação permanente, as camadas betuminosas devem ser delgadas, da ordem dos 5 cm para o conjunto das camadas de desgaste e de ligação;
- para obedecer ao critério de fadiga das camadas betuminosas, toda a estrutura do pavimento deve ter uma espessura reduzida, aproximadamente 13,5 cm.

Por fim, deve-se referir que, de todas as estruturas que foram analisadas, a estrutura de projeto é efetivamente a mais “equilibrada” estruturalmente. Não sendo possível obedecer-se a todos os critérios de ruína simultaneamente, a estrutura de projeto é a que, apesar de estar sobredimensionada, tem todos os valores do dano da mesma ordem de grandeza. Assim, considera-se que uma estrutura “ideal” a estrutura de projeto.

4.5. MÉTODOS CONSTRUTIVOS

Pretende-se neste subcapítulo descrever os procedimentos a aplicar na execução de um pavimento flexível tratado com cimento. Apenas será focada a execução na plena via, não sendo feita qualquer referência aos nós de ligação, ramos de acesso, passagens superiores, inferiores e agrícolas, pontes e viadutos.

A Portland Cement Association, na sua publicação *Soil-cement for commercial sites* (PCA, 2005) considera que são cinco os passos básicos para a mistura do solo-cimento *in situ*:

- formação inicial e classificação do local;
- aplicação do cimento na forma seca ou húmida (no caso de estudo: via semi-húmida);
- mistura de cimento e água com o solo;
- compactação e nivelamento fino;
- cura.

A prática, verificada com a análise do caso de estudo e Barros *et al.* (TRATCICA, 2008), confirmam estes passos, que de seguida serão descritos em pormenor.

A camada com solo-cimento é a primeira da estrutura do pavimento. Esta tarefa é executada em duas fases, sendo estas a aplicação da camada de solo (espalhamento e compactação) e a reciclagem com aplicação de cimento.

O processo de execução de uma qualquer via de comunicação inicia-se com a desmatamento e decapagem do terreno, com base na implantação topográfica. À medida que a zona se encontra desmatada, avança-se com a respetiva decapagem, garantindo o depósito provisório para posterior reposição da terra vegetal em aterros e taludes.

Após a decapagem da terra vegetal, inicia-se o processo de escavação/aterro para se garantirem as cotas da base da estrutura do pavimento, de acordo com os perfis transversais de projeto, assim como os trabalhos de execução dos drenos longitudinais (Figura 42) e do canal técnico (Figura 43).



Figura 42 - Execução de dreno longitudinal



Figura 43 - Canal técnico e dreno longitudinal

Findos os trabalhos de execução dos drenos longitudinais e do canal técnico inicia-se o processo de espalhamento do solo a tratar com cimento. Deve ser feito um levantamento topográfico (Figura 44) com o intuito de definir a espessura da camada do leito do pavimento.



Figura 44 - Levantamento topográfico

O solo, proveniente de escavação, antes de ser transportado para o local do espalhamento, deve ser escarificado por meio de trator de forma a facilitar o processo de seleção de materiais a usar. Na Figura 45 e Figura 46 estão representados os locais do solo selecionado para a mistura.



Figura 45 - Perspetiva geral da zona do solo selecionado



Figura 46 - Pormenor da zona de escavação

Durante a escavação do solo, deve ser tida especial atenção para evitar o uso de material com dimensão superior ao admissível (75 mm).

Posteriormente é feito o transporte do mesmo para a frente de obra, onde será espalhado, inicialmente com recurso a um trator do tipo bulldozer e finalizado com uma motoniveladora, conforme ilustra a Figura 47 e a Figura 48.



Figura 47 - Pormenor do transporte do solo



Figura 48 - Pormenor do espalhamento do solo

Nesta fase, a verificação da cota da camada de solo, antes da colocação da mistura com cimento, pode ser executada manualmente (Figura 49). A cota topográfica a que deve estar a camada, está inscrita nas estacas espaçadas longitudinalmente entre si 25 m, o trabalhador com recurso a um fio e fita métrica, mede transversalmente a diferença entre a cota da camada e a cota do projeto que está inscrita na estaca (Figura 50) e comunica ao manobrador da motoniveladora a medição feita. Este processo repete-se até as cotas coincidirem.



Figura 49 - Verificação da cota da camada



Figura 50 - Estaca com cota de projeto

Uma passagem ligeira com cilindro de rolos termina a operação de espalhamento do solo (Figura 51).



Figura 51 - Passagem de cilindro de rolos

Em todas as fases da construção deve ser verificado o teor de umidade da camada e sempre que necessário deve ser dada uma rega que facilite os trabalhos de compactação (Figura 52).



Figura 52 - Rega com água

De seguida, é feito o acompanhamento topográfico que deve ser constante durante a evolução dos trabalhos e sempre que uma camada é finalizada (Figura 53).



Figura 53 - Acompanhamento topográfico

Terminada a operação de espalhamento do solo, pode iniciar-se a mistura do mesmo com aplicação do cimento. Nesta tarefa procede-se inicialmente ao espalhamento do cimento (Figura 54) sobre a camada de acordo com a percentagem definida em estudo e com recurso a uma cisterna equipada com uma barra espalhadora e doseadora. Esta permite regular a percentagem de cimento a espalhar mediante a velocidade de marcha do trator (Figura 55).

Há que referir que a estabilização do solo-cimento foi feita por via semi-húmida. Este método consiste na mistura do solo com o cimento e água, por uma misturadora específica para o efeito. Esta tem acoplado um camião cisterna com água, e conforme vai passando, vai misturando os materiais e pulverizando o mesmo. Outros métodos que poderiam ser usados seriam por via seca ou húmida. Alternativamente, esta mistura podia ser feita em central, no entanto, refere-se que métodos mais rudimentares podem ser usados com a mesma eficácia de execução da mistura, apenas com rendimento manifestamente inferior.



Figura 54 - Espalhamento do cimento



Figura 55 - Pormenor do doseador do cimento

O controlo da percentagem de cimento que está a ser aplicada, é feito regularmente, para garantir-se as características do material solo-cimento. Este controlo é feito através de uma caixa, com dimensões conhecidas, que é deixada na superfície do terreno e onde é verificada, posteriormente, a quantidade de cimento após a passagem do trator (Figura 56).



Figura 56 - Controlo da percentagem de cimento

Seguidamente procede-se à mistura do solo com o cimento com recurso à recicladora (que efetua este processo, em toda a espessura com uma só passagem) que terá acoplado um depósito de água que será doseada através dos bicos da fresa na quantidade previamente definida (Figura 57 e Figura 58).



Figura 57 - Mistura do cimento com solo



Figura 58 – Equipamento de mistura do cimento

Na Figura 59 pode ver-se, em pormenor, o rotor da recicladora que efetua a mistura do solo com cimento e a pulverização da água e, na Figura 60, o aspeto do solo após a mistura e antes da compactação.



Figura 59 - Pormenor do rotor da recicladora

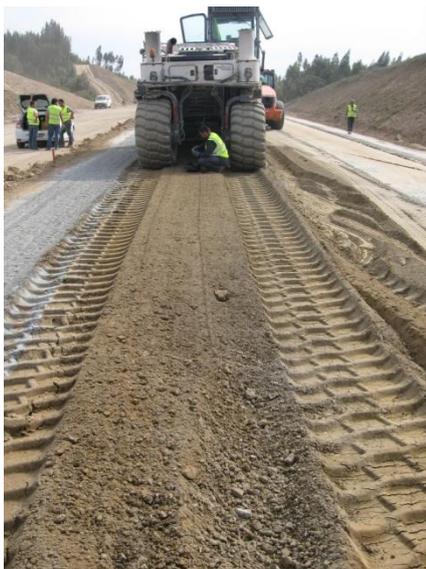


Figura 60 - Aspeto do solo após a mistura com o cimento

Segue-se a operação de nivelamento e compactação. Faz-se uma primeira compactação ligeira, imediatamente após a passagem da fresadora com recurso a cilindro vibrador (Figura 61, Figura 62 e Figura 63), a que se segue o nivelamento da camada com recurso a niveladora. Seguir-se-ão as passagens de cilindro que garantam a compactação exigida nas especificações técnicas.



Figura 61 - Compactação ligeira da camada de solo-cimento



Figura 62 - Passagem de cilindro de rolos compactador



Figura 63 - Passagem de cilindro logo após a fresa

No caso de estudo, as cotas da camada de solo-cimento são verificadas automaticamente a cada passagem da motoniveladora, visto esta estar dotada de equipamento comandado por GPS (Figura 64). Depois da passagem deste equipamento deve ser dada nova compactação, de acordo com as especificações vigentes.



Figura 64 - Nivelamento da camada de solo-cimento

Na Figura 65 e Figura 66 é possível visualizar os diferentes equipamentos inerentes à execução da camada de solo-cimento, a recicladora (com a cisterna de água acoplada), o cilindro compactador de rolos e a motoniveladora.



Figura 65 – Equipamentos para execução da camada de solo-cimento



Figura 66 - Fases de execução da camada de solo-cimento

A fim de garantir-se o teor de humidade do material, devem ser feitas regas por meio de trator cisterna (Figura 67). Estas são tão frequentes quanto maior for a temperatura no local.



Figura 67 - Rega do solo

No próprio dia deverá ser realizado um tratamento de cura, recorrendo-se a uma emulsão betuminosa à taxa de $0,6 \text{ kg/m}^2$ de betume residual (Figura 68). Este só deverá ser feito após controlo *in situ* das características do material. Na Figura 69 mostra-se o aspeto final da camada após o tratamento feito com a emulsão betuminosa.



Figura 68 - Tratamento de cura na camada de solo-cimento



Figura 69 - Aspeto final da camada após tratamento de cura

Com o objetivo de aferir o bom desempenho dos equipamentos e confirmar o estudo laboratorial da mistura de solo-cimento é feito um trecho experimental de solo-cimento. No caso de estudo foi executado em plena via, em duas faixas de 5 metros cada com cimento do tipo CEM II da classe 42,5 R às taxas de 3 e 3,5%.

De forma a garantir-se o necessário período de cura e, a traficabilidade da mistura de solo-cimento, foi executada uma faixa de cada vez e, a segunda, só foi executada após garantia de traficabilidade da primeira.

Após a mistura atingir as características que garantam a sua traficabilidade, será aplicada a camada de base em ABGE (Figura 70).



Figura 70 - Aplicação da camada de base em ABGE

O processo de execução desta camada é similar à fase inicial de aplicação do solo-cimento excetuando a fase de mistura do solo com cimento. Deverá portanto ser espalhada e compactada obedecendo às cotas de projeto. Também nesta camada deve ser verificado o teor em água e devem efetuar-se regas se tal for necessário.

Em relação á estrutura inicial, comparada no subcapítulo anterior, as camadas de ABGE de base e sub-base dessa estrutura, são feitas de forma similar à que é prevista como base deste pavimento com leito em solo-cimento. E a partir desta camada de base, o método de construção dos dois pavimentos é similar.

Na Figura 71 pode ver-se a diferença entre a camada de base em ABGE e a camada de solo-cimento após rega de cura.



Figura 71 - Camada de base, camada de solo-cimento

Assim que estejam garantidas as características desta camada, verificadas após testes de laboratório, deve ser dada uma rega de impregnação (C 40 BP 4) que garanta a colagem com a camada de ligação em macadame betuminoso (AC 20 bin 35/50). Se necessário, antes da rega de impregnação, a camada de ABGE deve ser varrida para excluir material eventualmente solto que exista à superfície desta e que prejudique a ligação com a camada seguinte (Figura 72, Figura 73 e Figura 74).



Figura 72 - Camada de base a ser varrida



Figura 73 - Diferença antes/depois da camada ser varrida



Figura 74 - Aspeto da camada de base após rega de impregnação

Antes da camada de ligação são feitas as valetas, visto que a camada betuminosa inferior deve “rematar” no topo deste elemento (Figura 75).



Figura 75 - Execução de valetas

Por fim, é chegada a fase de execução das camadas betuminosas. Inicia-se com a camada de ligação com 6 cm e, por fim, faz-se a de desgaste com 5 cm. Esta fase não será descrita tão detalhadamente quanto a anterior, visto não ser esse o objetivo deste estudo.

Neste caso, a pavimentadora executa de uma só passagem toda a largura da faixa de rodagem, ficando apenas a berma por pavimentar. Esta é a situação ideal, visto evitarem-se juntas longitudinais na faixa de rodagem (Figura 76).



Figura 76 - Execução da camada de ligação em macadame betuminoso

Após a passagem da pavimentadora, a camada deve ser compactada inicialmente por meio de cilindro de pneus e só a passagem deste é que devem ser feitas passagens com cilindro de rolos (Figura 77 e Figura 78).



Figura 77 - Pormenor da passagem inicial do cilindro de pneus



Figura 78 - Compactação da camada betuminosa

As juntas transversais, necessárias quando a via não é pavimentada de uma só vez, são realizadas no fim do dia de trabalho por meio de um disco de corte existente no cilindro de pneus (Figura 79).



Figura 79 - Junta transversal



Figura 80 - Aspeto da camada de macadame betuminoso

Acabada a execução da camada de ligação, são executadas as obras acessórias tais como, separador central (no caso, do tipo *new jersey*), Figura 81 e Figura 82 e caleiras de rasgo contínuo, Figura 83 e Figura 84 antes de ser aplicada a camada betuminosa final.



Figura 81 - Execução do separador central



Figura 82 - Execução de separador central



Figura 83 - Execução de caleira de rasgo contínuo



Figura 84 - Pormenor da execução da caleira de rasgo contínuo

Por último, é dada uma rega de colagem (C 75 BP 4) e efetuada a camada de desgaste (AC 14 surf 35/50) com cerca de 5 cm concluindo-se os trabalhos de pavimentação da estrada. Só após esta camada ser executada, são pintadas as marcas da sinalização horizontal, colocada a sinalização vertical, etc.

4.6. ANÁLISE ECONÓMICA

Neste secção da tese, faz-se uma análise económica (estrutura inicial sem solo-cimento VS estrutura com solo-cimento, com o objetivo de aferir a vantagem que o solo-cimento tem a nível económico.

Note-se que a equipa necessária para a execução do leito do pavimento tratado com solo-cimento, na fase de espalhamento e compactação do solo é a mesma equipa necessária para a execução das camadas de ABGE para a estrutura inicial e é constituída pelos seguintes recursos:

- Equipamento:
 - 1 motoniveladora;
 - 1 trator (tipo D6);
 - 1 cilindro compactador (15 ton);
 - Número de camiões a dimensionar em função da distância de transporte;
 - 1 giratória (45 ton);
 - 1 trator agrícola com cisterna de água (8000 l).

- Mão-de-obra:
 - 1 encarregado;
 - Condutores/manobradores para o equipamento afeto;
 - 3 serventes.

No que diz respeito à fase de fresagem com aplicação de cimento (apenas para a estrutura com leito do pavimento tratada com solo-cimento), a equipa é constituída pelos seguintes recursos:

- Equipamento:
 - Cisterna de cimento com barra espalhadora e doseadora;
 - 1 recicladora;
 - 1 motoniveladora;
 - 1 cilindro compactador (15 ton);
 - 1 cilindro de pneus;
 - 1 Auto cisterna com caldeira e dispositivo de rega para emulsões.

- Mão-de-obra:
 - 1 encarregado;
 - Condutores/manobradores para o equipamento afeto;
 - 2 serventes.

De seguida, na

Tabela 33, apresenta-se o estudo económico comparativo (a preços de Junho 2012) para a execução de cada uma das estruturas, a flexível inicial (sem solo-cimento) e a flexível com solo-cimento.

No caso de estudo, o rendimento na execução da camada de solo-cimento foi considerado 4000 m² por dia.

Tabela 33 - Estudo económico

| Estrutura | | | Base | Sub base | AC 20 bin 35/50 | AC 14 surf 35/50 | TOTAL | Área de pavimento [m ²] | Custo total | Diferença |
|--------------|---------------------------|------|------|----------|-----------------|------------------|-------|-------------------------------------|-------------|-------------------|
| | Sc | ABGE | | | | | | | | |
| Inicial | e [cm] | - | 15 | 15 | 15 | 10 | 5 | 60 | 5 893 710 € | 1 201 320 € 20,4% |
| | custo [€/m ²] | - | 2,82 | 2,82 | 2,82 | 11,68 | 7,53 | 27,67 | | |
| Solo-cimento | e [cm] | 25 | - | 15 | - | 6 | 5 | 51 | 4 692 390 € | |
| | custo [€/m ²] | 4,67 | - | 2,82 | - | 7,01 | 7,53 | 22,03 | | |

Pela análise da

Tabela **33**, é evidente a economia resultante da escolha pela solução em pavimento flexível com solo-cimento comparativamente com pavimento flexível sem solo-cimento.

Apesar de o custo da camada de solo-cimento ser superior ao custo de uma camada de ABGE, o incremento que a camada de solo-cimento acrescenta, permite diminuir o número de camadas de ABGE e a espessura das camadas betuminosas (estas as mais onerosas) resultando numa poupança de cerca de 20%.

4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram comparados dois tipos de estruturas de pavimento flexíveis com o intuito de perceber a opção pela aplicação do solo-cimento como camada estrutural. Após o estudo exaustivo as vantagens do uso do solo-cimento como material de pavimentação são óbvias e sinteticamente são as seguintes:

- ambientais: a diferença de espessura das duas estruturas é de cerca de **18%**;
- estruturais: aumento de cerca de **sete vezes** o número de eixos padrão admissíveis;
- económicas: a diferença entre as duas propostas é de cerca de **20%**.

Se as vantagens são óbvias e comprovadas com os números resultantes das análises feita neste capítulo, as desvantagens não são tão evidentes. Da experiência obtida no caso de estudo, estas prendem-se com o uso do cimento e com a necessidade de equipamento específico para execução da mistura. Nesta obra, por exemplo, foi necessária a contratação de uma empresa espanhola que executou toda a tarefa de mistura, nivelamento e compactação do solo-cimento. A dependência do fornecedor de cimento também se revelou como uma desvantagem a ter em conta, visto que atrasos na entrega do material condicionaram por vezes o rendimento do trabalho.

5

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, apresentam-se as principais conclusões referentes aos assuntos abordados em cada um dos capítulos desta tese.

Por fim, indicam-se perspectivas para investigação futura.

5.2 CONCLUSÕES

Pretende esta secção apresentar uma síntese das conclusões retiradas de cada um dos capítulos.

Começa-se por referir as conclusões relativas ao capítulo 2, “Solo-cimento como material de pavimentação em pavimentos flexíveis”. O manual de pré-dimensionamento português, MACO-PAV (JAE, 1995), aborda superficialmente aos assuntos no que ao solo-cimento diz respeito, por exemplo, não é referida a influência da percentagem de cimento na capacidade resistente desta camada.

Sobre o capítulo 3, “Influência do solo-cimento na resposta estrutural e no dimensionamento de pavimentos flexíveis” há a salientar que:

- a influência das características mecânicas (módulo de deformabilidade) das misturas betuminosas é a mais notória na camada de solo-cimento, mas a variação da espessura das camadas betuminosas tem mais influência na capacidade do pavimento;
- os critérios de ruína em análise (fadiga das camadas betuminosas, fadiga da camada de solo-cimento e deformação permanente) beneficiam com o aumento da espessura da camada de solo-cimento;
- a colagem ou descolagem na interface entre solo-cimento e fundação conduz a diferenças estruturais mais notórias no topo do solo de fundação;

No que se refere ao capítulo 4, “Caso de estudo: “Subconcessão do Pinhal Interior: IC3 – Lanço Tomar/Avelar Sul””, a comparação entre dois pavimentos flexíveis distintos, com e sem solo-cimento, evidencia as diferenças entre estas duas estruturas. Como referido nesse capítulo, constata-se que as vantagens da utilização do solo-cimento são ambientais, estruturais e económicas

5.3 PERSPETIVAS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA

Apresentam-se, de seguida, algumas perspetivas de investigação futura que poderão dar continuidade, em trabalhos futuros.

Relativamente ao *material solo-cimento* refere-se a necessidade de:

- estudo de expressões que permitam relacionar as características mecânicas deste material, nomeadamente o módulo de deformabilidade ou a resistência, com a percentagem de cimento da mistura;

Relativamente ao *comportamento estrutural de pavimentos flexíveis* constituídos por solo-cimento:

- estudo sobre a influência do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas na capacidade estrutural do pavimento, considerando-se modelos materiais avançados (viscoelasticidade linear, etc.);
- definição de metodologia, com base em técnica de otimização, que minimize o dano estrutural, tendo como dados o número de eixos padrão de dimensionamento e as características dos materiais.

Bibliografia

- ASCENDI; ENGIVIA (2011). *Subconcessão do Pinhal Interior: IC3 – Lanço Tomar Avelar Sul. Projeto de Execução. Volume 8 – Pavimentação (Revisão A)*. Ascendi, Portugal;
- ATIC (1993). *Estradas de solo-cimento*, Associação Técnica da Indústria do Cimento, Portugal.
- BARROS, R.; GUIMARÃES, C.; FERREIRA, C. (2008). *A utilização de solos tratados com cimentos nos pavimentos do Autódromo Internacional do Algarve, vias de circulação e ligação à Auto-estrada A22*, TRATCICA 2008, Porto
- BRANCO,F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. (2011). *Pavimentos Rodoviários*, Almedina, Coimbra.
- BRÁS, M. (2012). *Validação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis indicados no “Manual de conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional”*, Departamento de Eng. Civil da FEUP, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, especialização em Vias de Comunicação.
- CEN (2003a). *EN 13286-41 – Unbound and hydraulic bound mixtures. Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures*, Comité Européu de Normalização, Bruxelas
- CEN (2003b). *EN 13286-42 – Unbound and hydraulic bound mixtures. Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulic bound mixtures*, Comité Européu de Normalização, Bruxelas
- CONSOLI, N.C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. (2007). *Key parameters for strength control of artificially cemented soils*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(2), 197-205;
- Cost 333 (1999). *Development of New Bituminous Pavement Design Method: Final Report of the Action*, European Commission, Directorate General Transport, Luxembourg.
- EP (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra – Terraplenagem*, Estradas de Portugal.
- INIR, Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (sem data). *Diretivas para a conceção de Pavimentos – Critérios de dimensionamento*, Disposições Normativas.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (2011). *Norma Portuguesa NP EN 13108-1 – Misturas betuminosas, Especificações do materiais, parte1: betão betuminoso*
- JAE (1995). *Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas (JAE), Almada.
- LCPC et Setra (1994). *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée – Guide technique*, Laboratoire Central des Pont et Chaussées (LCPC) et Services d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Paris.
- LNEC E 197 (1972). *Solo-cimento. Ensaio de compactação*. Especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa;
- LNEC E 264 (1972). *Solo-cimento. Ensaio de compressão*, Especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa;
- MATOS FERNANDES, M. (2006). *Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais – Volume 1*, FEUP Edições, Portugal.
- NORME 6.1-IC. *Boletín Oficial del Estado núm. 297. Viernes 12 de Diciembre de 2003. Sec I. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.*

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (2005). *Soil-cement for comercial sites – The low cost alternative for heavy-duty industrial pavements*, Portland Cement Association, Illinois;

RIOS, S. (2011). *A general Framework for the geomechanical characterisation of artificially cemented soil*, Departamento de Eng. Civil da FEUP, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.

SANTOS, M. P. (1951). *Ensaaios normais de Solo-cimento*, Sociedade de Estudos da Colónia de Moçambique, Lourenço Marques (Maputo).

SANTOS, M. P. (1962). *Progressos no projeto e construção de estradas em solo-cimento*, Sociedade de Estudos de Moçambique, Lourenço Marques (Maputo).

SANTOS, M. P. (1967). *Curso de Solo-cimento*, Sociedade de Estudos da Colónia de Moçambique, Lourenço Marques (Maputo).

SHELL (1977). *Asphalt pavement design manual*. Shell International Petroleum Company (Shell), London;

VALE, C. (2004). *Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*, Departamento de Engenharia Civil, Dissertação

VALE, C. (2008). *Influence of vertical load models on flexible pavement response – an investigation*, International Journal of Pavement Engineering

VITALI, O. (2008). *Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e de resistência*, Departamento de Eng. Civil da FEUP, dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em Engenharia Civil, especialização em Geotecnia.

Bibliografia Complementar

- FORTUNATO, E. (2008). *Tratamento de Materiais com Cal e/ou Cimento para Infra-Estruturas de Transporte*, TRATCICA 2008, Porto.
- NUNES, Â. (2008). *Ligantes para consolidação de solos. Aplicações e vantagens ambientais*, TRATCICA 2008, Porto.
- CONSOLI, N.C.; LOPES JUNIOR, L.S. (2008). *Parâmetros-chave para o controle da resistência de solos tratados com cal e cimento*, TRATCICA 2008, Porto.
- NEVES, J. (2008). *Características mecânicas e físicas de solos tratados para o dimensionamento de pavimentos*, TRATCICA 2008, Porto.
- KRAEMER, C. (2008). *Normativa Española*, TRATCICA 2008, Porto.
- MINGUELA, J.D. (2008). *Estabilización de suelos con cemento*, TRATCICA 2008, Porto.
- MINGUELA, J.D. (2008). *Reciclado de firmes in situ com cemento*, TRATCICA 2008, Porto.
- FERNÁNDEZ, M.L.-B. (2008). *Maquinaria para la realización de estabilizaciones de suelos*, TRATCICA 2008, Porto.
- CASPURRO, I.; DIAS, S. (2008). *Experiência de aplicação de solo-cimento em obras da Rede Rodoviária Nacional. Alguns casos de aplicação*, TRATCICA 2008, Porto.
- SANTOS, L.L.; PEREIRA, L.F.; LOPES, J.P. (2008). *Aplicação de solo-cimento na Força Aérea. Exemplo prático*, TRATCICA 2008, Porto.
- APORBET (1996). *Misturas Betuminosas*, Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, Portugal;
- VALE, C; MELO, A.S. (2006). *Análise do comportamento de pavimentos flexíveis: os modelos materiais das misturas betuminosas*, V Jornadas Luso-Brasileiras de pavimentos: políticas e tecnologias, Brasil;