



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS BETUMINOSAS:
Metodologia para o Cálculo da Temperatura de Serviço**

LUCÍLIA DO CARMO FARIA AQUINO



Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra,
como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre
em Engenharia Civil, especialização em Engenharia Urbana

Coimbra, Setembro de 2000

RESUMO

A deformação permanente é o tipo de degradação mais comum e um dos principais indicadores do estado dos pavimentos flexíveis, revelando-se bastante penalizante para as condições de circulação, quer em termos de comodidade de circulação, quer em termos de condições de segurança.

O objectivo do trabalho foi o de poder contribuir para uma avaliação mais real da deformação permanente em misturas betuminosas, no caso de Portugal Continental, nomeadamente através da definição de uma metodologia simplificada de cálculo da temperatura de serviço para a consideração deste critério de ruína.

Faz-se uma apresentação dos modelos de comportamento de materiais usualmente utilizados em trabalhos rodoviários e uma descrição dos ensaios laboratoriais geralmente usados para caracterização das misturas betuminosas. É exposto o modo como foi realizada a quantificação das acções, tráfego e temperatura. Procedeu-se à recolha de metodologias existentes de estudo da deformação permanente, fez-se uma reflexão sobre as suas limitações, concluindo pela selecção de modelos aplicáveis ao caso presente.

Foram ainda desenvolvidos diferentes métodos para a cálculo da temperatura de serviço, fez-se uma comparação dos resultados obtidos relativamente a um método de referência, o qual serviu de base ao desenvolvimento destes modelos, concluindo pela selecção de um dos modelos estudados. Fica-se assim com a possibilidade de usar uma forma simples de estimar a temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis a usar em Portugal Continental.

ÍNDICE:

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
1.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	5
CAPÍTULO 2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	6
2.1. MODELOS FÍSICOS DE COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS.....	6
2.1.1. <i>Modelo Físico para o Comportamento Elástico</i>	7
2.1.2. <i>Modelo Físico para o Comportamento Viscoso</i>	9
2.1.3. <i>Modelos Físicos que Traduzem um Comportamento Visco-elástico</i>	11
2.2. ENSAIOS LABORATORIAIS RELEVANTES PARA O ESTUDO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS BETUMINOSAS.....	25
2.2.1. <i>Generalidades</i>	25
2.2.2. <i>Ensaio Triaxiais</i>	25
2.2.3. <i>Ensaio de Fluência</i>	29
2.2.4. <i>Ensaio de "wheel-tracking"</i>	34
2.3. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS: DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	35
2.3.1. <i>Introdução</i>	35
2.3.2. <i>Composição das Misturas Betuminosas</i>	36
2.3.3. <i>Modelo Elástico e Linear</i>	39
2.3.4. <i>Modelo Visco-elástico</i>	49
2.3.5. <i>Modelo Visco-elasto-plástico</i>	55
2.3.6. <i>Modelo Bimodular</i>	56
2.4. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS DE FUNDAÇÃO E DE CAMADAS GRANULARES.....	58
2.4.1. <i>Solos de Fundação</i>	58
2.4.2. <i>Camadas Granulares</i>	59
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
CAPÍTULO 3. QUANTIFICAÇÃO DE ACÇÕES.....	67

3.1. GENERALIDADES	67
3.2. TRÁFEGO.....	68
3.3. TEMPERATURA	72
3.3.1. <i>Introdução</i>	72
3.3.2. <i>Métodos PTE e PETP para o Estabelecimento das Temperaturas de Serviço</i>	74
3.3.3. <i>Considerações sobre a Aplicação dos Métodos</i>	75
3.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

CAPÍTULO 4. METODOLOGIAS DE ESTUDO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE...77

4.1. MODELOS DE COMPORTAMENTO UTILIZÁVEIS.....	77
4.1.1. <i>Generalidades</i>	77
4.1.2. <i>Método da Shell para o Critério da Deformação Permanente</i>	81
4.1.3. <i>Método da Universidade de Nottingham para o Critério da Deformação Permanente</i>	83
4.1.4. <i>Modelo do Asphalt Institute para o Cálculo da Deformação Permanente</i>	84
4.1.5. <i>Modelo Moebius para o Cálculo de Rodeiras</i>	85
4.1.6. <i>Modelo Vesys para o Cálculo da Deformação Permanente</i>	87
4.1.7. <i>Modelo desenvolvido por COLLOP</i>	89
4.1.8. <i>Modelo desenvolvido por HOPMAN</i>	91
4.1.9. <i>Modelo desenvolvido por SCARPAS</i>	91
4.1.10. <i>Modelo desenvolvido por WEISSMAN e SOUSA</i>	91
4.1.11. <i>Modelo desenvolvido por WRIGHT e ZHENG</i>	91
4.1.12. <i>Modelo desenvolvido por KHANAL</i>	91
4.1.13. <i>Modelo desenvolvido por IOANNIDES</i>	91
4.1.14. <i>Modelo desenvolvido por RAMSAMOOJ</i>	92
4.1.15. <i>Modelo desenvolvido por HUANG</i>	92
4.2. SELECÇÃO DOS MODELOS A UTILIZAR	92
4.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

CAPÍTULO 5. MODELOS DE CÁLCULO DA TEMPERATURA DE SERVIÇO 96

5.1. INTRODUÇÃO.....	96
5.2. ESTRUTURAS TIPO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	96
5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	97
5.3.1. <i>Misturas Betuminosas</i>	97
5.3.2. <i>Solo de Fundação</i>	99
5.3.3. <i>Camadas Granulares</i>	99

5.3.4. Coeficiente de Poisson.....	100
5.4. O TRÁFEGO.....	100
5.5. A TEMPERATURA.....	100
5.6. MODELOS DE CÁLCULO DO ESTADO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO.....	101
5.7. CRITÉRIOS DE RUÍNA UTILIZADOS.....	103
5.8. MODELOS DESENVOLVIDOS.....	103
5.9. MODELO PROPOSTO.....	113
5.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113
5.10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES GERAIS. TRABALHO FUTURO.....	127
6.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	127
6.2. TRABALHO FUTURO.....	128
6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	128
6.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
ANEXO A . TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA DO AR E TEMPERATURA MÉDIA MÍNIMA DO AR, PARA O MÊS DE AGOSTO.....	129
A.1. TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA DO AR PARA O MÊS DE AGOSTO.....	129
A.2. TEMPERATURA MÉDIA MÍNIMA DO AR PARA O MÊS DE AGOSTO.....	130
ANEXO B. MÉTODO DO ESPECTRO HORÁRIO.....	131
B.1. INTRODUÇÃO.....	131
B.2. MÉTODO DO ESPECTRO HORÁRIO PARA O PAÍS (MEH PAÍS).....	131
B.3. MÉTODO DO ESPECTRO HORÁRIO PARA A ZONA (MEH ZONA).....	131
B.3.1. METSHELL 85.....	131
B.3.2. METSHELL 95.....	132
B.3.3. METNOT R.....	132
B.3.4. METNOT C.....	132
B.4. MÉTODO DO ESPECTRO HORÁRIO PARA A LOCALIZAÇÃO (MEH LOC).....	133
B.4.1. METSHELL 85.....	133
B.4.2. METSHELL 95.....	134
B.4.3. METNOT R.....	135
B.4.4. METNOT C.....	136

B. 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
ANEXO C. MÉTODO DO ESPECTRO MÉDIO	138
C. 1. INTRODUÇÃO	138
C. 2. MÉTODO DO ESPECTRO MÉDIO PARA O PAÍS (MEM PAÍS)	138
C. 3. MÉTODO DO ESPECTRO MÉDIO PARA A ZONA (MEM ZONA).....	138
C. 3.1. <i>METSHELL 85</i>	138
C. 3.2. <i>METSHELL 95</i>	139
C. 3.3. <i>METNOT R</i>	139
C. 3.4. <i>METNOT C</i>	139
C. 4. MÉTODO DO ESPECTRO MÉDIO PARA A LOCALIZAÇÃO (MEM LOC).....	140
C. 4.1. <i>METSHELL 85</i>	140
C. 4.2. <i>METSHELL 95</i>	141
C. 4.3. <i>METNOT R</i>	142
C. 4.4. <i>METNOT C</i>	143
C. 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
ANEXO D. DIFERENÇAS DE ESPESSURAS BETUMINOSAS	145
D. 1. INTRODUÇÃO	145
D. 2. <i>METSHELL 85</i>	145
D. 3. <i>METSHELL 95</i>	158
D. 4. <i>METNOT R</i>	172
D. 5. <i>METNOT C</i>	185
D. 6. MÉDIA E DESVIO PADRÃO	198
D. 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
ANEXO E. DIFERENÇAS DE ESPESSURAS BETUMINOSAS: <i>METSHELL 85</i> E <i>METNOT R</i>, UTILIZANDO MEM PARA O PAÍS OBTIDO PARA <i>METSHELL 95</i>	200
E. 1. INTRODUÇÃO	200
E. 2. <i>METSHELL 85</i> E <i>MET NOT C</i>	200
E. 3. MÉDIA E DESVIO PADRÃO	214
E. 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	214

- No Anexo E são apresentadas as diferenças entre espessuras betuminosas encontradas com a aplicação do método de referência (PAVIFLEX) e a aplicação de métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados, o METNOT em que é utilizado o estado de ruína para a verificação do dimensionamento, METNOT R, e o METSHELL em que é utilizada a probabilidade de sobrevivência do pavimento a 85%, METSHELL 85, quando se aplica o modelo proposto para o cálculo da temperatura de serviço, o MEM para o País. Tal como no caso anterior, são igualmente apresentados a média e desvio padrão respectivos.

1.4. Referências Bibliográficas

- [1.1] **BENSE P. (1998)** - *Dangers, causes et remèdes de l'orniérage des chaussées*, Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, nº. 759, pp. 39-43, Fevereiro.
- [2.1] **LNEC (1962)** - Especificação E 1, *Vocabulário de Estradas e Aeródromos*, LNEC, Lisboa.
- [3.1] **LNEC (1973)** - Especificação E 284, *Terminologia rodoviária - Pavimento*, LNEC, Lisboa.
- [4.1] **WRIGHT, P. J.; ZHENG, L. (1996)** - *Calculation of deformation in flexible pavements*, Flexible Pavements, A. Gomes Correia editor, pp. 215-221, IST - LNEC, Lisboa, Portugal.
- [5.1] **BRANCO, F. E. F.; PICADO-SANTOS, L. (1995)** - Apontamentos da disciplina de *Pavimentos Rodoviários*, Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Especialidade em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [6.1] **ANTUNES, M. L. (1998)** - *Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários*, Relatório 163/98 - NPR/DVC, LNEC, Lisboa.
- [7.1] **PICADO-SANTOS, L. (1995)** - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Doutor, DEC da FCTUC, Coimbra.
- [8.1] **PICADO-SANTOS, L. (1996)** - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [9.1] **JAE (actual IEP) (1995)** - *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*, JAE, Almada.

Para este tipo de materiais é também habitual utilizar valores para o coeficiente de Poisson entre 0,30 e 0,35 ([2.2]), [15.2] e [19.2]).

2.5. Referências bibliográficas

- [1.2] **SILVA, V. DIAS (1995)** - *Mecânica e Resistência dos Materiais*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Ediliber Editora, Coimbra.
- [2.2] **BRANCO, FERNANDO E. F.; PICADO-SANTOS, L. (1995)** - Apontamentos da disciplina de *Pavimentos Rodoviários*, Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Especialidade em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [3.2] **THROWER E. N. (1975)** - *A deformation model for flexible road pavements*, TRRL Supplementary Report 183 UC, Berkshire.
- [4.2] **THROWER E. N. (1975)** - *Permanent deformation in a linear visco-elastic model of a road pavement*, TRRL Supplementary Report 184 UC, Berkshire.
- [5.2] **GERRITSEN, A. H.; VAN GURP, C. A. M. P.; VAN HEIDE, J. P. J.; MOLENAAR, A. A. A.; PRONK, A. C. (1987)** - *Prediction and prevention of surface cracking in asphalt pavements*, Proceedings of the sixth International Conference on asphalt pavements, Vol. 3, pp. 378-391, Ann Arbor, Michigan.
- [6.2] **DRESCHER, A.; KIM, J. R.; NEWCOMB, D. E. (1993)** - *Permanent deformation in asphalt concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, pp. 112-128, Fevereiro.
- [7.2] **COLLOP, A. C.; CEBON, D.; HARDY, M. S. A. (1995)** - *Viscoelastic approach to rutting in flexible pavements*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, pp. 82-93, Janeiro/Fevereiro.
- [8.2] **COLLOP, A. C.; CEBON, D. (1995)** - *Parametric study of factors affecting flexible-pavement performance*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, pp. 485-494, Novembro/Dezembro.
- [9.2] **COLLOP, A. C.; CEBON, D. (1997)** - *A theoretical model of long-term flexible pavement performance*, Proceedings of the Eighth International Conference on asphalt pavements, pp. 631-646, Seattle, Washington.
- [10.2] **ANTUNES, M. L.; BATISTA A. L.; PINA, C. A. B. (1997)** - *Calculation of stresses in the interface between asphalt and newpave, using visco-elastic models*, Relatório 205/97 - NPR/NDE/NEE, LNEC, Lisboa.

- [11.2] **WRIGHT, P. J., ZHENG, L. (1996)** - *Calculation of deformation in flexible pavements*, Flexible Pavements, A. Gomes Correia editor, pp 215-221, IST - LNEC, Lisboa, Portugal.
- [12.2] **HOPMAN, P. C.; PRONK, A. C.; KUNST, P. A. J. C.; MOLENAAR, A. A. A.; MOLENAAR, J. M. M. (1992)** - *Application of the visco-elastic properties of asphalt concrete*, Proceedings of the Seventh International Conference on Asphalt Pavements, Vol. I, pp. 73-88, Nottingham.
- [13.2] **HOPMAN, P. C.; NILSSON, R. N.; PRONK, A. C. (1997)** - *Theory, validation and application of the visco-elastic multilayer program Veroad*, Proceedings of the Eighth International Conference on asphalt pavements, pp. 693-704, Seattle, Washington.
- [14.2] **KHANAL, P.; MAMLOUK, M. S. (1997)** - *Program BIMODPAV for analyses of flexible pavements*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 123, pp. 43-50, Janeiro/Fevereiro.
- [15.2] **PICADO-SANTOS, L. (1995)** - *Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis - Obtenção das características dos materiais - Critérios de ruína mais utilizados*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [16.2] **E 34 / LNEC (1957)** - *Determinação de ponto de amolecimento pelo método de anel e bola*, LNEC, Lisboa.
- [17.2] **NORMA PORTUGUESA 82 (1956)** - *Ensaio de penetração de betumes a 25 °C*, Imprensa Nacional, Lisboa.
- [18.2] **PICADO-SANTOS, L. (1988)** - *Dimensionamento analítico de pavimentos rodoviários flexíveis*, Relatório de Aula Teórica apresentada no âmbito das Provas de Aptidão Científica e Pedagógica, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [19.2] **JAE (actual IEP) (1995)** - *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*, JAE, Almada.
- [20.2] **LNEC (1997)** - *Revisão da Especificação E 80 - 1960 - Betumes de Pavimentação*, LNEC, Lisboa.
- [21.2] **DRESCHER, A.; KIM, J. R.; NEWCOMB, D. E. (1997)** - *Rate sensitivity of asphalt concrete in triaxial compression*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 9, pp. 76-84, Maio.
- [22.2] **WEISSMAN, S. L.; SOUSA, J. B. (1996)** - *An elastoplastic constitutive law for asphalt-aggregate mixtures*, Flexible Pavements, A. Gomes Correia editor, pp 207-214, IST - LNEC, Lisboa, Portugal.

- [23.2] **WRIGHT, P. J.; ZHENG, L. (1994)** - *Visco-elasto-plastic behaviour of a rolled asphalt mixture under repeated loading and effects of temperature*, South Bank University, Londres.
- [24.2] **SHELL BITUMEN (1991)** - *The Shell Bitumen Handbook*, Shell Bitumen UK, Chertsey.
- [25.2] **CLAXTON, M.; WATKINS, S. (1997)** - *Prédiction de la performance des enrobés sous trafic lent*, Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n°. 757, pp. 71-74, Dezembro.
- [26.2] **LANÇON, D.; MARCIANO, Y.; MAIA, A. F.; LE CLERC, S. (1997)** - *Shell Multiphalte sur la manège du LCPC à Nantes*, Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n°. 757, pp. 65-70, Dezembro.
- [27.2] **SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY** - *Asphalt Pavement Design Manual*, Shell, London, 1977.
- [28.2] **MAHBOUB K. (1990)** - *Asphalt concrete creep as related to rutting*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 2, pp. 147-163, Agosto.
- [29.2] **ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES (1991)** - *Recherche en matière de routes et de transports routiers - Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures rotières - Rapport réalisé par un groupe d'experts scientifique de l'OCDE*, OCDE, Paris.
- [30.2] **XICHENG, QI; SEBAALY, P. E.; EPPS JON, A. (1995)** - *Evaluation of polymer modified asphalt concrete mixtures*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, pp. 117-124, Maio.
- [31.2] **BROWN, E. R.; FOO, K. Y. (1994)** - *Comparison of unconfined and confined creep tests for hot mix asphalt*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, pp. 307-326, Maio.
- [32.2] **JAE (actual IEP) (1997)** - *Especificação de Agregados utilizados na Pavimentação e Produção de Betões segundo o Caderno de Encargos da Junta Autónoma de Estradas*, JAE, Almada.
- [33.2] **LNEC (1962)** - *Especificação E 1 - Vocabulário de Estradas e Aeródromos*, LNEC, Lisboa.
- [34.2] **WITCZAK, M. (1995)** - *Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, pp. 273-282.
- [35.2] **SCARPAS, A.; AL-KHOURY, R. I. N.; VAN GURP, C. A. P. M.; ERKENS, S. M. J. G. (1997)** - *Finite Elements Simulation of Damage Development in Asphalt Concrete Pavements*, Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Washington.

- [36.2] **YANG, H. HUANG (1993)** - *Pavement Analysis and Design*, University of Kentucky, Prentice Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [37.2] **BAPTISTA, ANTÓNIO M. (1999)** - *Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Mestre, DEC, FCTUC, Coimbra.
- [38.2] **LNEC (1973)** - Especificação E 284, *Terminologia rodoviária - Pavimento*, Lisboa.
- [39.2] **CAPITÃO, SILVINO D. (1996)** - *Misturas betuminosas fabricadas a quente - Principais aspectos a considerar nos estudos de formulação*, Relatório de Estágio Formal para admissão à Ordem dos Engenheiros, edição do autor, Coimbra.
- [40.2] **CAPITÃO, SILVINO D. (1996)** - *Misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade - Contribuição para a caracterização do seu comportamento*, Dissertação submetida à FCTUC, para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, especialização em Engenharia Urbana, DEC da FCTUC, Coimbra.
- [41.2] **FREIRE, A. C. F. O. R. (1998)** - *Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários*, Relatório 163/98 - NPR/DVC, LNEC, Lisboa.
- [42.2] **GERRITSEN, A. H. (1988)** - *Development of test and interpretation techniques to describe the dynamic visco-elastic behaviour of asphalt mixes, using Burger's Model*, Royal Shell Laboratory, Amsterdam. (Excerto não confidencial).
- [43.2] **KIM, J. R. ; DRESCHER, A.; NEWCOMB, D. E. (1997)** - *Rate sensitivity of asphalt concrete in triaxial compression*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 9, pp. 76-84, Maio.
- [44.2] **CHABERT, D.; TRIQUIGNEAUX, J. P.; VANISCOTE, J. C. (1998)** - *Rhéologie des liants élastomères et résistance à l'orniérage des enrobés*, Revue Générale des Routes et des Aérodomes, n.º. 761, pp. 53-57, Abril.
- [45.2] **YANG LU; WRIGHT, P. J. (2000)** - *Temperature Related Visco-elastoplastic Properties of Asphalt Mixtures*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, pp. 58-65, Janeiro/Fevereiro.
- [46.2] **AL-ABDUL-WAHHAB, H.; AL-AMRI G. (1991)** - *Laboratory evaluation of reclaimed rubber asphaltic concrete mixes*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 3, pp. 189-203, Agosto.

- [47.2] **CROIX des PLILIPPE (1997)** - *Esso Road Design Technology. Un ensemble performant d'outils d'aide à la decision. Un exemple: l'analyse non linéaire de l'orniérage d'une chaussé*, Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, nº. 748, pp. 39-43, Fevereiro.
- [48.2] **JOLIVET, Y.; MALOT, M.; RAMOND, G.; PASTOR, M. (1994)** - *Contribution des mesures rhéologiques sur liants à la prevision de l'orniérage en laboratoire*, Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, nº. 194, pp. 4-10, Novembro-Dezembro.
- [49.2] **AL-ABDUL-WAHHAB, H.; AL-AMRI, G. (1991)** - *Laboratory evaluation of reclaimed rubber asphaltic concrete mixes*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 3, pp. 189-203, Agosto.
- [50.2] **AL-SUGAIR, H. F.; ALMUDAIHEEM, J. A. (1992)** - *Variations in measured resilient modulus of asphalt mixes*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 4, pp. 343-352, Novembro.
- [51.2] **GOSS, D.; CARRÉ, D. (1996)** - *Modélisation rhéologique des liants bitumineux modifiés*, Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, nº. 742, pp. 62-66, Julho-Agosto.
- [52.2] **JACOBS, F. A. (1977)** - *Properties of rolled asphalt and asphaltic concrete at different states of compaction*, TRRL Supplementary Report 288 UC, Berkshire.
- [53.2] **ASSOCIATION INTERNACIONALE PERMANENTE DES CONGRÉS DE LA ROUTE (1995)** - *Rapport du Comité des routes souples*, XX^{ème} Congrè Mondial de la Route, Montréal.
- [54.2] **PICADO-SANTOS, L. (1995)** - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Doutor, Coimbra.
- [55.2] **PICADO-SANTOS, L. (1995)** - *Método de dimensionamento da Shell para pavimentos rodoviários flexíveis (adaptação às condições portuguesas)*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, 2^a. edição, Coimbra.
- [56.2] **CLAESSEN, A. I. M.; EDWARDS, J. M.; SOMMER, P.; UGÉ, P. (1977)** - *Asphalt Pavement Design Manual: the Shell Method*, Proceedings of the Fourth International Conference on Asphalt Pavements, Vol.3 , pp. 39-74, Ann Arbor, Michigan.
- [57.2] **LIJZENGA, J. (1997)** - *On the prediction of pavement rutting in the Shell Pavement Design method* - Paper presented at 2nd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials, Leeds, Abril.

- [58.2] **ECKMAN, B. (1987)** - *Rut depth prediction: a practical verification*, Proceedings of the sixth International Conference on asphalt pavements, pp. 209-219, Ann Arbor, Michigan.
- [59.2] **IOANNIDES, A. M.; KHAZANOVICH, L.; (1998)** - *General Formulation for multilayered Pavement Systems*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, pp. 82-90, Janeiro/Fevereiro.
- [60.2] **RAMSAMOOJ, D. V.; RAMADAN, P. P. E.; LIN, G. S. (1998)** - *Model Prediction of Rutting in Asphalt Concrete*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, pp. 448-456, Setembro/Outubro.
- [61.2] **THOM, N.; COLLOP, A. C.; ELLIOTT, R. C. (1998)** - *A fresh approach to rut prediction in asphalt*, Proceedings of the Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. I, pp. 329-338, Trondheim, Norway.
- [62.2] **MOLENAAR, A. A. A.; HOUBEN, L. J. M. (1998)** - *Fatigue and permanent deformation resistance of asphalt mixtures can be specified*, Proceedings of the Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. II, pp. 1077-1088, Trondheim, Norway.
- [63.2] **LNEC (1970)** - Especificação E 240, *Solos - classificação para fins rodoviários*, Lisboa.
- [64.2] **KHALID, H. A.; ETA, K. E. (1999)** - *Permanent deformation characteristics of bituminous emulsion macadams*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, Maio, pp. 103-111.
- [65.2] **ANIMESH DAS; PANDEY, B. B. (1999)** - *Mechanistic-Empirical Design of Bituminous Roads: An Indian Perspective*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, pp. 463-471, Setembro/Outubro.

No capítulo 5 são apresentados os modelos encontrados para fixação da temperatura de serviço, através da determinação das temperaturas de serviço às diversas profundidades, permitindo a caracterização mecânica das camadas betuminosas. O trabalho desenvolvido reflecte todo um processo de sucessivas simplificações, concluindo-se pela exactidão dos modelos estudados. O modelo proposto tem a enorme vantagem de ser uma função apenas da temperatura do ar, permitindo determinar a temperatura de serviço a qualquer profundidade.

3.4. Referências Bibliográficas

- [1.3] PICADO-SANTOS, L. (1995) - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Dissertação submetida à FCTUC, para obtenção do grau de Doutor, Coimbra.
- [2.3] PICADO-SANTOS, L. (1996) - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [3.3] JAE (actual IEP) (1995) - *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*, JAE, Almada.
- [4.3] BAPTISTA, ANTÓNIO M. (1999) - *Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Mestre, DEC, FCTUC, Coimbra.
- [5.3] PICADO-SANTOS, L. (1988) - *Dimensionamento analítico de pavimentos rodoviários flexíveis*, Relatório de Aula Teórica apresentada no âmbito das Provas de Aptidão Científica e Pedagógica, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [6.3] LIMA, H.; QUARESMA, L.; FONSECA, E. (1999) - *Caracterização do Factor de Agressividade do Tráfego de Pesados em Portugal*, JAE/LNEC, Proc. 092/16/12991, Lisboa.

4.3. Referências Bibliográficas

- [1.4] ASSOCIATION INTERNACIONALE PERMANENTE DES CONGRÉS DE LA ROUTE (1995) - *Rapport du Comité des routes souples*, XX^{ème} Congrè Mondial de la Route, Montréal.
- [2.4] PICADO-SANTOS, L. (1988) - *Dimensionamento analítico de pavimentos rodoviários flexíveis*, Relatório de Aula Teórica apresentada no âmbito das Provas de Aptidão Científica e Pedagógica, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [3.4] PICADO-SANTOS, L. (1995) - *Método de dimensionamento da Shell para pavimentos rodoviários flexíveis (adaptação às condições portuguesas)*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, 2^a. edição, Coimbra.
- [4.4] PEREIRA, PAULO (1995) - *Apontamentos da disciplina de Conservação de Pavimentos Rodoviários*, Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Especialidade em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [5.4] PICADO-SANTOS, L. (1995) - *Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis - Obtenção das características dos materiais - Critérios de ruína mais utilizados*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [6.4] YANG H. HUANG (1993) - *Pavement Analysis and Design*, University of Kentucky, Prentice Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [7.4] MERRIL, D.; BROWN, A. J.; PHILLIPS, S.; LUXMOORE, A. (1998) - *A new approach to modelling flexible pavement response*, Proceedings of the Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. I, Trondheim, Norway.
- [8.4] ANTUNES, M. L. (1998) - *Requirements and deterioration mechanisms of the main pavement components - COST 333 - Development of new bituminous pavement Design method - Task 1.1 - INTERIM REPORT*, Relatório 155/98 - NPR/NDE/NEE, LNEC, Lisboa.
- [9.4] LIJZENGA, J. (1997) - *On the prediction of pavement rutting in the Shell Pavement Design method* - Paper presented at 2nd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials, Leeds, Abril.
- [10.4] CLAESSEN, A. I. M.; EDWARDS, J. M.; SOMMER, P.; UGÉ, P. (1977) - *Asphalt Pavement Design Manual: the Shell Method*, Proceedings of the Fourth International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 39-74, Ann Arbor, Michigan.

- [11.4] **MAMLOUK, M. S.; ZANIEWSKI, J. P.; WEI HE (2000)** - *Analysis and Design Optimization of Flexible Pavement*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, pp. 161-167, Março/Abril.
- [12.4] **MAHBOOUB, K. (1990)** - *Asphalt concrete creep as related to rutting*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 2, pp. 147-163, Agosto.
- [13.4] **BRANCO, FERNANDO E. F.; PICADO-SANTOS, L. (1995)** - Apontamentos da disciplina de *Pavimentos Rodoviários*, Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Especialidade em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [14.4] **ECKMAN, B. (1987)** - *Rut depth prediction: a practical verification*, Proceedings of the Sixth International Conference on Asphalt Pavements, pp. 209-219, Ann Arbor, Michigan.
- [15.4] **ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES (1991)** - *Recherche en matière de routes et de transports routiers - Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures rotières - Rapport réalisé par un groupe d'experts scientifique de l'OCDE*, OCDE, Paris.
- [16.4] **CLAXTON, M.; WATKINS, S. (1997)** - *Prédiction de la performance des enrobés sous trafic lent*, Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n°. 757, pp. 71-74, Dezembro.
- [17.4] **COLLOP, A. C.; CEBON, D.; HARDY, M. S. A. (1995)** - *Viscoelastic approach to rutting in flexible pavements*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, pp. 82-93, Janeiro/Fevereiro.
- [18.4] **COLLOP, A. C.; CEBON, D. (1995)** - *Parametric study of factors affecting flexible-pavement performance*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, pp. 485-494, Novembro/Dezembro.
- [19.4] **COLLOP, A. C.; CEBON D. (1997)** - *A theoretical model of long-term flexible pavement performance*, Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, pp. 631-646, Seattle, Washington.
- [20.4] **HOPMAN, P. C.; PRONK, A. C.; KUNST, P. A. J. C.; MOLENAAR, A. A. A.; MOLENAAR, J. M. M. (1992)** - *Application of the visco-elastic properties of asphalt concrete*, Proceedings of the Seventh International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 73-88, Nottingham.
- [21.4] **HOPMAN, P. C.; NILSSON, R. N.; PRONK A. C. (1997)** - *Theory, validation and application of the visco-elastic multilayer program Veroad*, Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Vol. I, pp. 693-704, Seattle, Washington.

- [22.4] SCARPAS, A.; AL-KHOURY, R. I. N.; VAN GURP, C. A. P. M.; ERKENS, S. M. J. G. (1997) - *FiniteElements Simulation of Damage Development in Asphalt Concrete Pavements*, Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Washington.
- [23.4] WEISSMAN, S. L.; SOUSA, J. B. (1996) - *An elastoplastic constitutive law for asphalt-aggregate mixtures*, Flexible Pavements, A. Gomes Correia Editor, pp 207-214, IST - LNEC, Lisboa, Portugal.
- [24.4] WRIGHT, P. J.; ZHENG, L. (1994) - *Visco-elasto-plastic behaviour of a rolled asphalt mixture under repeated loadind and effects of temperature*, South Bank University, Londres.
- [25.4] WRIGHT, P. J.; ZHENG, L. (1996) - *Calculation of deformation in flexible pavements*, Flexible Pavements, A. Gomes Correia Editor, pp 215-221, IST - LNEC, Lisboa, Portugal.
- [26.4] KHANAL, P.; MAMLOUK, M. S. (1997) - *Program BIMOPAV for analyses of flexible pavements*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 123, pp. 43-50, Janeiro/Fevereiro.
- [27.4] IOANNIDES, A. M.; KHAZANOVICH, L.; (1998) - *General Formulation for multilayered Pavement Systems*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, pp. 82-90, Janeiro/Fevereiro.
- [28.4] RAMSAMOOJ, D. V.; RAMADAN, P. P. E.; LIN, G. S. (1998) - *Model Prediction of Rutting in Asphalt Concrete*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, pp. 448-456, Setembro/Outubro.
- [29.4] BAPTISTA, ANTÓNIO M. (1999) - *Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Mestre, DEC, FCTUC, Coimbra.
- [30.4] PICADO-SANTOS, L. (1995) - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Doutor, Coimbra.
- [31.4] PICADO-SANTOS, L. (1996) - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [32.4] JAE (actual IEP) (1995) - *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*, JAE, Almada.

5.10. Referências Bibliográficas

- [1.5] **PICADO-SANTOS, L. (1995)** - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Doutor, Coimbra.
- [2.5] **PICADO-SANTOS, L. (1996)** - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- [3.5] **BAPTISTA, ANTÓNIO M. (1999)** - *Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Mestre, DEC, FCTUC, Coimbra.
- [4.5] **JAE (actual IEP) (1995)** - *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*, JAE, Almada.
- [5.5] **NORMA PORTUGUESA 82 (1956)** - *Ensaio de penetração de betumes a 25 °C*, Imprensa Nacional, Lisboa.
- [6.5] **LNEC (1997)** - *Revisão da Especificação E 80 - 1960 - Betumes de Pavimentação*, Lisboa.
- [7.5] **PEREIRA, P. A. A.; PAIS, J. C.; SOUSA, J. B. (1998)** - *Validation of SHRP A - 698 permanent deformation concepts for different truck speeds*, Proceedings of the Fifth International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. I, pp. 339-348, Trondheim, Norway.
- [8.5] **LNEC (1973)** - *Especificação E - 284, Terminologia rodoviária - Pavimento*, Lisboa.

6.2. Trabalho Futuro

A caracterização das misturas betuminosas têm vindo a ser realizada com recurso a modelos elásticos lineares, procedimento mais comum no dimensionamento de pavimento rodoviários flexíveis. Considera-se necessário o desenvolvimento e implementação de outros modelos que caracterizem com uma maior acuidade o comportamento real das misturas betuminosas. Para isto a contribuição dada por este trabalho será muito importante, já que permite, de forma simples, considerar as temperaturas de serviço.

Pensa-se que os modelos apresentados poderão ser aplicados a outras classes de fundação do MADIPAV (FP1 - $E = 30$ MPa; FP4 - $E = 150$ MPa), uma vez que a influência da sua capacidade resistente na temperatura de serviço pode ser considerada diminuta [1.6]. No entanto, haverá que verificar essa possibilidade.

6.3. Considerações Finais

Pensa-se que foram atingidos os objectivos propostos. Espera-se com o presente trabalho poder contribuir com mais uma ferramenta de trabalho que permita simplificar, sem a perda de rigor desejável, alguns dos procedimentos necessários no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis. A solução final do dimensionamento terá sempre que ser uma solução de compromisso entre as diferentes soluções preconizadas pelos diferentes métodos, devidamente abalizada, em que o projectista terá de assumir algum grau de risco, adopção esta inerente à actividade de dimensionar ou projectar.

6.3. Referências Bibliográficas

- [1.6] PICADO-SANTOS, L. (1995) - *Temperatura de serviço em pavimentos rodoviários flexíveis - Elementos para a sua determinação*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Doutor, Coimbra.
- [2.6] BAPTISTA, ANTÓNIO M. (1999) - *Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*, Dissertação submetida à FCTUC para obtenção do grau de Mestre, DEC, FCTUC, Coimbra.
- [3.6] JAE (actual IEP) (1995) - *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*, JAE, Almada.

C.5. Referências Bibliográficas

[1.C] SPIEGEL, M. R. (1978) - *Probabilidades e Estatística*, Coleção Schaum, Mc-Graw - Hill, São Paulo - Brasil.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{bet(i)} - \Delta_{betméd})^2}{n-1}} \quad (11.5)$$

sendo:

DP - desvio padrão da diferença de espessura entre camadas betuminosas (cm).

Quadro 5.D - Média e Desvio Padrão das diferenças entre espessuras betuminosas.

MÉTODO	dif. Hbet	MEH País	MEH Zona	MEH Loc	MEM País	MEM Zona	MEM Loc
METSHELL 85	Média (cm)	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
	DP (cm)	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
METSHELL 95	Média (cm)	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0
	DP (cm)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5
METNOT R	Média (cm)	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4
	DP (cm)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
METNOT C	Média (cm)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	DP (cm)	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0

D.7. Referências Bibliográficas

[1.D] SPIEGEL, M. R. (1978) - *Probabilidades e Estatística*, Coleção Schaum, Mc-Graw - Hill, São Paulo - Brasil.

E.3. Média e Desvio Padrão

Quadro 2.E - Média e Desvio Padrão das diferenças entre espessuras betuminosas, utilizando MEM para o País, obtido para METSHELL 95.

METSHELL 85	
Média (cm)	-1
DP (cm)	1,1

METNOT R	
Média (cm)	0
DP (cm)	1,6

E.4. Referências Bibliográficas

[1.E] SPIEGEL, M. R. (1978) - *Probabilidades e Estatística*, Coleção Schaum, Mc-Graw - Hill, São Paulo - Brasil.

