

Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Elisabete F. Freitas¹, Paulo A. A. Pereira²

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

Os pavimentos rodoviários flexíveis, frequentemente, não desempenham as funções para as quais foram concebidos, observando-se uma redução prematura da sua qualidade.

A partir da observação da qualidade estrutural dos pavimentos, definida pelos parâmetros de estado deflexão e estado superficial, e do cálculo da vida residual, abordou-se neste artigo o estudo do desempenho estrutural de vários pavimentos submetidos a diferentes condições de solicitação. A análise do desempenho fez-se quer quanto à sua evolução, quer quanto aos factores que o podem influenciar.

Os resultados indicam que a qualidade de construção tem uma influência determinante na vida residual. Além disso, o conhecimento dos dados de projecto, a avaliação inicial da qualidade dos pavimentos, o desenvolvimento de modelos de correcção do módulo de deformabilidade e o controlo das causas de erro no cálculo da vida residual, são factores que permitem apoiar o estudo da evolução do desempenho dos pavimentos de uma forma mais fiável.

1. INTRODUÇÃO

A partir da Segunda Grande Guerra a rede rodoviária sofreu, na generalidade, uma enorme evolução, quer ao nível da sua extensão, quer ao nível do volume de tráfego e das respectivas cargas. Em Portugal esta evolução verificou-se numa forma mais notória com o Plano Rodoviário Nacional 85 (DL 380/85) e com a adesão à CEE em 1985, e posteriormente com o Plano Rodoviário Nacional 2000 (DL 222/98). Com a implementação destes planos verificou-se um grande aumento de extensão da rede construída. Actualmente, verifica-se também um aumento da necessidade de realização de acções de conservação para repor a qualidade, quer estrutural, quer funcional. A estas acções de conservação estão associados custos, quer para a administração da rede rodoviária, quer para os utentes. A análise destes custos, ao longo do ciclo de vida dos pavimentos, tem por objectivo avaliar as consequências de diferentes estratégias de conservação, resultantes das decisões de gestão da conservação dos pavimentos.

As decisões de conservação apoiam-se em informação, quer relativa ao estado passado, quer da previsão desse estado ao longo do tempo, de modo a otimizar a utilização dos recursos financeiros a investir na infra-estrutura rodoviária. Esta informação é tratada por ferramentas designadas por Sistemas de Gestão da Conservação.

¹ Assistente

² Professor Associado com Agregação

A avaliação da qualidade é a componente dos sistemas de gestão que procura compreender se os padrões de qualidade de serviço predefinidos, estão a ser atingidos, usando para tal a avaliação do estado observado (estrutural e funcional) (Matos, 1997).

A avaliação estrutural da qualidade procura definir o estado da estrutura do pavimento quanto à capacidade de suportar as cargas para que foi projectado, sob a acção de determinadas condições climáticas.

A avaliação funcional tem por objectivo definir a qualidade do pavimento, face às exigências dos utentes das estradas, nomeadamente quanto ao conforto e à segurança.

Frequentemente, verifica-se que os pavimentos apresentam uma degradação prematura da sua qualidade, quer estrutural, quer funcional.

O desempenho dos pavimentos, entendido como a capacidade de suportar as cargas do tráfego e como a capacidade de oferecer uma superfície de circulação confortável e segura, é estudado actualmente quanto à sua componente estrutural através da vida residual. Quanto à componente funcional o desempenho é estudado a partir da observação dos parâmetros de estado irregularidade longitudinal e transversal, atrito e degradações superficiais.

A vida residual dum pavimento é uma medida da sua capacidade de suportar cargas, definida pelo número de passagens de um eixo de referência que o conduzirá à ruína, num determinado momento da sua vida.

Para calcular a vida residual, é fundamental caracterizar-se, através de metodologias adequadas, quer o estado superficial dos pavimentos, quer a sua deformabilidade, assim como definir os parâmetros de caracterização mecânica dos materiais constituintes das camadas.

Assim, de modo a estudar-se o desempenho estrutural dos pavimentos rodoviários analisou-se um vasto conjunto de secções representativas da rede rodoviária nacional, sendo a estrutura, a zona climática e o tráfego os principais critérios de selecção. Deste conjunto, determinou-se a vida residual de cinco secções em diversos anos, a partir das quais se procurou compreender o seu desempenho.

2. ESTUDO DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS

O desempenho estrutural dos pavimentos estuda-se correntemente a partir da análise da vida residual. O cálculo da vida residual baseia-se numa metodologia que, a partir da observação da deflexão e do estado superficial, permite caracterizar estruturalmente o pavimento, e, assim, calcular o número de aplicações de carga admissíveis, através de leis de comportamento dos materiais.

Para realizar a avaliação da vida residual há vários parâmetros a ter em conta: a geometria do pavimento e as características dos materiais; a periodicidade de observação da deflexão e a respectiva análise; as condições de aplicação de carga; o efeito da variação da temperatura e o respectivo modo de correcção; as leis utilizadas na previsão do módulo de deformabilidade. Além disso, é importante conhecer a influência de todas as fontes de erro decorrentes do processo de cálculo da vida residual.

Este trabalho resultou da selecção de 23 secções de estudo, distribuídas ao longo de todo o país (Figura 1), das quais se seleccionaram 5 secções (90, 190, 161, 162 e 253) com o objectivo de estudar a evolução do desempenho estrutural dos respectivos pavimentos (Freitas, 2001). Nestas 5 secções foram realizados ensaios de caracterização complementares, sobre materiais recolhidos em sondagens por poços, realizadas no ponto característico respectivo, nomeadamente o CBR, donde se determinaram novas espessuras. O ponto característico representa a deflexão correspondente ao percentil de 85% de todas as bacias de deflexão observadas de 50 em 50 m na secção, para o mês com deflexão máxima mais elevada.

O estudo do desempenho estrutural desenvolveu-se em três fases, às quais correspondem três hipóteses de cálculo da vida residual.

Na primeira fase considerou-se a espessura de cada uma das camadas que constituem os pavimentos, determinada a partir de sondagens por poços. Excepcionalmente, os dados relativos à secção 253 são dados de projecto. Além disso, considerou-se que as características físicas e mecânicas dos materiais correspondem às indicadas no manual de dimensionamento da Junta Autónoma de Estradas (JAE, 1995).

Na segunda fase considerou-se a espessura de cada uma das camadas do pavimento determinada a partir da realização de novas sondagens no ponto característico. As características físicas e mecânicas consideraram-se as mesmas da fase 1.

Na terceira fase consideram-se as espessuras representativas da deformabilidade da secção e as características de resistência do solo de fundação determinadas em laboratório. Além disso, efectuou-se uma correcção do valor da deflexão medida com o deflectómetro de impacto (FWD).

Para além do estudo da evolução do desempenho, a comparação da vida residual calculada em cada uma das fases permitirá avaliar o efeito das variações de espessura ao longo das secções, assim como avaliar o efeito das fontes de erro, nomeadamente as referentes aos equipamentos de observação.

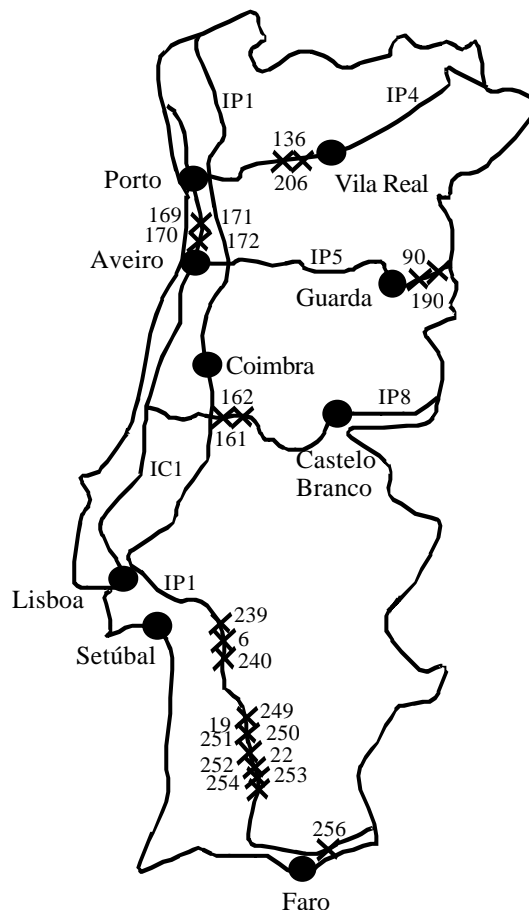


Figura 4.1 – Mapa de localização das secções de estudo

3. CARACTERIZAÇÃO DAS SECÇÕES DE ESTUDO

As secções de estudo foram caracterizadas, com base na realização de sondagens por poços, quanto à espessura e tipo de materiais, e quanto às características mecânicas do solo de

fundação. Além disso, foram realizadas várias observações do estado superficial com o equipamento DESY, em diferentes anos e em diferentes meses, simultaneamente com a medição da deflexão através do deflectómetro de impacto.

Numa primeira fase realizaram-se duas sondagens em cada secção de 500 m de extensão, respectivamente a 125 m do início e do fim. Numa segunda fase, após a análise da deflexão, realizou-se uma terceira sondagem localizada no ponto característico da secção. No Quadro 1 apresenta-se as espessuras das camadas obtidas e a respectiva descrição do material constituinte.

A espessura das camadas que constituem os pavimentos apresentam variações significativas em distâncias relativamente pequenas, quer quanto à componente betuminosa, quer quanto à componente granular. No caso da secção 253, não se verifica qualquer semelhança entre a estrutura de projecto e a estrutura obtida na sondagem.

A partir da medição da espessura em 8 pontos das lajes retiradas nas sondagens efectuadas (Quadro 2) verificou-se que numa área inferior a 1 m² existem diferenças de espessura importantes, nomeadamente na secção 161, com uma diferença de 1,8 cm.

As características mecânicas do solo de fundação (Quadro 3), avaliadas pelo CBR respectivo, classificam-se entre uma resistência razoável a muito boa, nomeadamente para a secção 161, em que o CBR tem o valor de 53%. Estes valores são ligeiramente superiores aos indicados pelo manual de dimensionamento da JAE para materiais da mesma classe de fundação. O valor da expansão dos solos é muito reduzido ou nulo, indicando, assim, uma reduzida redução das propriedades mecânicas na presença de água.

Quadro 1 – Caracterização da estrutura das secções de estudo

| Secção | Camada | Esp. inicial (cm) | Esp. ponto caract. (cm) | Descrição do material (2ª sondagem) |
|--------|--------|-------------------|---------------------------------|---|
| 90 | BB | 17,9 | 18,0 | Mistura betuminosa |
| | BG | 32,5 | 18,0 | Tout-venant granítico |
| | SbG | 20,8 | 16,0 | Tout-venant granítico |
| 190 | BB | 22,2 | 23,0 | Mistura betuminosa |
| | BG | 35,0 | 15,0 | Tout-venant granítico |
| | SbG | 19,0 | 15,0 | Tout-venant granítico |
| 161 | BB | 26,0 | 21,5 | (Cam. inferior facilmente desagregável) |
| | BG | 14,3 | 16,0 | Tout-venant granítico quartzoso |
| 162 | BB | 18,8 | 22,5 | Mistura betuminosa |
| | BG | 18,5 | 20,0 | Tout-venant granítico quartzoso |
| 253 | BB | 9,0 | 13,7 | Mistura betuminosa |
| | | 30,0 (BG) | 7,0 | Tout-venant calcário com argila |
| | | 40,0 (SbG) | 20,0 | Tout-venant calcário com argila |
| | | | 7,0 | Marga calcária ligada com betume |
| | | | 13,0 | Calcário alterado |
| | | | 5,0 | Quartzite ligado com betume |
| | | 8,0 | Tout-venant calcário (alterado) | |

Nota: a secção 162 tem um perfil em escavação, as restantes secções têm um perfil em aterro.

Quadro 2 – Variação de espessuras da camada betuminosa

| Secção N.º | Dimensão da laje (cm×cm) | E1 (cm) | E2 (cm) | E3 (cm) | E4 (cm) | E5 (cm) | E6 (cm) | E7 (cm) | E8 (cm) | Desvio max. (cm) |
|------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|
| 90 | 62×100 | 18,2 | 18,0 | 19,0 | 18,2 | – | – | – | – | 1,0 |
| 190 | Med. num lado | 23,2 | 23,1 | – | – | – | – | – | – | 0,1 |
| 161 | 106×83 | 22,0 | 20,8 | 22,5 | 22,0 | 22,5 | 21,5 | 22,0 | 22,6 | 1,8 |
| 162 | 92×90 | 22,5 | 22,5 | 22,2 | 22,5 | 22,0 | 22,5 | 22,0 | 21,5 | 1,0 |
| 253 | 92×103 | 13,6 | 13,5 | 14,0 | 12,7 | 13,5 | 14,0 | 13,9 | 14 | 1,3 |

O estado superficial foi observado nos meses de Setembro de 1997, Abril de 1998 e Julho de 2000 sendo esta última observação acompanhada duma observação mais rigorosa do ponto característico de cada secção. No Quadro 4 apresenta-se a densidade de degradação (percentagem da extensão da secção que apresenta degradações) ao longo do tempo e o estado superficial no ponto característico. A densidade de degradação não apresenta uma evolução coerente devido a diversas intervenções de conservação, cujas técnicas ocultam o estado real da superfície do pavimento.

A observação da deflexão foi efectuada quatro vezes entre 1997 e 2000, quer no Verão, quer no Inverno (Quadro 5). A deflexão máxima apresenta, de uma forma geral, valores de deformabilidade médios, cerca de 400 μm , para as secções 161, 162 e 190. A secção 90 apresenta valores de deflexão da ordem dos 800 μm , o que se correlaciona bem com o estado superficial observado.

A evolução da deflexão ao longo do tempo é aleatória, não sendo possível definir entre os meses observados um padrão de comportamento. No entanto, salienta-se que a última observação foi realizada sob temperaturas da ordem dos 40 °C.

Quadro 3 – Características mecânicas do solo de fundação

| Secção N.º | CBRadp (%) | CBR (%) | W _n (%) | W _{op} (%) | γ_d (g.cm ⁻³) | Expansão (%) | Água absorvida (%) |
|------------|------------|---------|--------------------|---------------------|----------------------------------|--------------|--------------------|
| 90 | 10 | 20 | 7,7 | 9,7 | 2,05 | 0,0 | 0,05 |
| 190 | 5 | 22 | 10,0 | 9,6 | 2,04 | 0,5 | 0,66 |
| 161 | 5 | 53 | 8,7 | 8,4 | 2,18 | 0,1 | 0,76 |
| 162 | 10 | 15 | 14,7 | 12,7 | 1,96 | 0,2 | 3,45 |

Quadro 4 – Caracterização do estado superficial

| Secção | Mês | | | ES (ponto característico) |
|--------|---------|---------|---------|---------------------------|
| | Set. 97 | Abr. 98 | Jul. 00 | |
| 90 | 97 | 100 | 99 | ES4 |
| 161 | 0 | 8 | 4 | ES0 |
| 162 | 88 | 97 | 89 | ES1 |
| 190 | 100 | 100 | 8 | ES0 |

Quadro 5 – Caracterização da deflexão

| Secção N.º | Mês | Deflexão medida (μm) | | | | | | | | | Temperatura (°C) | | | |
|------------|------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------|------|-------|-------|
| | | 0 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 210 | 240 | Tar | Tcam | Tsup. | Hora |
| 90 | Ab97 | 629 | 461 | 366 | 279 | 163 | 107 | 68 | 36 | 23 | 17,0 | 14,0 | – | – |
| | Dz97 | 908 | 666 | 536 | 406 | 202 | 111 | 67 | 33 | 27 | 9,5 | 8,4 | – | 13:10 |
| | Mr98 | 854 | 587 | 448 | 321 | 153 | 79 | 52 | 23 | 14 | 23,0 | 25,6 | – | 16:30 |
| | Jn98 | 844 | 578 | 433 | 318 | 166 | 97 | 60 | 25 | 17 | 17,0 | 15,0 | – | 9:40 |
| | St00 | 784 | 540 | 405 | 276 | 136 | 74 | 52 | 38 | 30 | – | 40,5 | – | 14:50 |
| 161 | Ab97 | 362 | 279 | 233 | 194 | 127 | 83 | 52 | 26 | 22 | 11,0 | 13,0 | – | – |
| | Dz97 | 375 | 289 | 249 | 215 | 150 | 99 | 62 | 28 | 20 | 3,9 | 7,0 | – | 2:25 |
| | Mr98 | 523 | 402 | 320 | 250 | 133 | 76 | 46 | 23 | 18 | 13,0 | 13,6 | – | 10:50 |
| | Jn98 | 771 | 487 | 346 | 249 | 126 | 66 | 42 | 27 | 16 | 23,0 | 29,0 | – | 20:15 |
| | St00 | 573 | 414 | 335 | 238 | 130 | 72 | 44 | 32 | 27 | – | – | 37,4 | 16:40 |
| 162 | Ab97 | 259 | 205 | 174 | 148 | 103 | 74 | 53 | 29 | 21 | 18,0 | 14,7 | – | – |
| | Dz97 | 305 | 262 | 234 | 202 | 147 | 104 | 72 | 38 | 29 | 3,9 | 7,0 | – | 2:05 |
| | Mr98 | 415 | 346 | 281 | 228 | 137 | 84 | 55 | 29 | 21 | 13,0 | 13,6 | – | 10:40 |
| | Jn98 | 533 | 352 | 268 | 203 | 115 | 65 | 41 | 25 | 20 | 23,0 | 27,0 | – | 20:40 |
| | St00 | 520 | 347 | 264 | 186 | 104 | 62 | 42 | 30 | 24 | – | – | 37,4 | 16:55 |
| 190 | Ab97 | 302 | 210 | 158 | 123 | 68 | 43 | 31 | 17 | 16 | 17,0 | 14,0 | – | – |
| | Dz97 | 428 | 286 | 207 | 151 | 71 | 41 | 29 | 20 | 19 | 9,5 | 8,4 | – | 13:00 |
| | Mr98 | 360 | 235 | 173 | 127 | 70 | 42 | 31 | 20 | 15 | 23,0 | 26,0 | – | 16:35 |
| | Jn98 | 378 | 263 | 196 | 144 | 84 | 49 | 36 | 21 | 17 | 17,0 | 15,0 | – | 9:25 |
| | St00 | 429 | 302 | 236 | 160 | 80 | 45 | 32 | 20 | 19 | – | – | 41,2 | 14:40 |

A deflexão apresenta valores semelhantes ou inferiores a alguns dos meses anteriores, contrariamente ao que seria de esperar, dado que o solo de fundação é pouco sensível à água e que as espessuras das camadas betuminosas são relativamente elevadas (> 180 mm).

Quanto à forma da bacia de deflexão verifica-se que esta é alongada, uma vez que os seus valores são consideravelmente elevados até cerca de 240 cm do centro de aplicação da carga. Como este tipo de comportamento é pouco habitual, em Setembro de 2000 realizaram-se ensaios de capacidade de suporte com a viga Benkleman no ponto característico, de modo a confirmar a forma da bacia de deflexão obtida com o FWD, assim como a sua área de influência.

Na Figura 2 apresenta-se, para a secção 161, a sobreposição das bacias de deflexão obtidas com os dois equipamentos. As restantes bacias de deflexão têm um desenvolvimento semelhante. As diferenças obtidas na parte inicial da bacia devem-se, em princípio, à redução de rigidez da componente betuminosa devido à temperatura elevada.

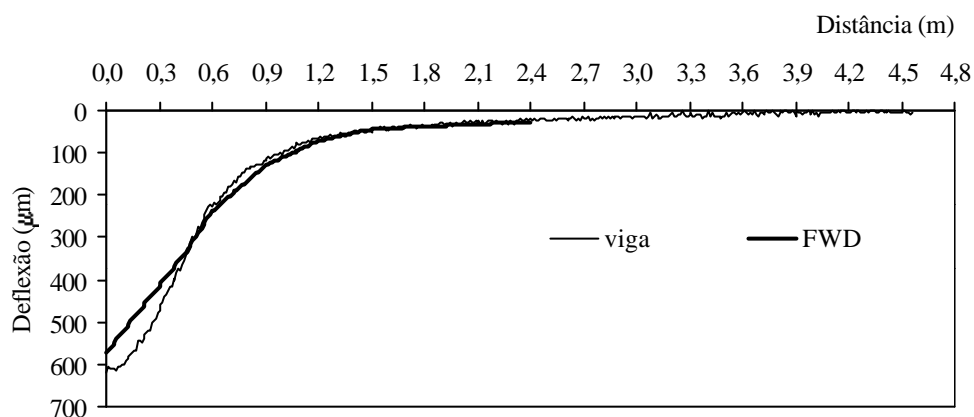


Figura 2 – Sobreposição das bacias de deflexão da secção 161

4. CÁLCULO DO MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

O módulo de deformabilidade calculou-se iterativamente, pelo método da análise inversa, considerando os seguintes dados: os valores da deflexão, a geometria e a natureza e estado das camadas do pavimento, e as propriedades do solo de fundação.

O método de análise inversa tem como primeiro passo a atribuição de módulos de deformabilidade a cada uma das camadas que constitui o pavimento. Após calcular a bacia de deflexão resultante da aplicação duma carga padrão, com a ajuda do programa de cálculo estrutural ELSYM5, comparam-se as deflexões calculadas com as deflexões observadas. Este procedimento repete-se até que o erro entre as deflexões medidas e as deflexões calculadas seja mínimo (Molenaar, 1994), obtendo-se deste modo os módulos representativos do estado estrutural do pavimento.

Para a primeira e para segunda fases, o ajuste das bacias de deflexão é aceitável apenas numa parte da bacia (Quadros 6 e 7). A partir de 150 cm do centro de aplicação da carga, a diferença entre as deflexões é quase sempre superior a 100%. Devido a esta dificuldade de ajuste, a qual impede a correcta modelação da estrutura, formulou-se uma terceira hipótese para os meses de Verão e de Inverno com maior deformabilidade. Nesta terceira fase, à deflexão medida com o deflectómetro de impacto retirou-se em todos os pontos o valor observado a 240 cm do centro de aplicação da carga. O ajuste obtido desta forma é superior ao obtido anteriormente (Quadro 8).

Quadro 6 – Deflexão medida / deflexão calculada (fase 1)

| Secção N.º | Deflexão medida (µm) - Deflexão calculada (µm) | | | | | | | | | |
|------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|------|
| | Mês | 0 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 210 | 240 |
| 90 | Ab97 | 629-612 | 461-442 | 366-344 | 279-273 | 163-171 | 107-105 | 68-61 | 36-16 | 23-6 |
| | Dz97 | 908-945 | 666-618 | 536-460 | 406-344 | 202-191 | 111-104 | 67-53 | 33-8 | 27-1 |
| | Mr98 | 854-865 | 587-612 | 448-459 | 321-345 | 153-192 | 79-104 | 52-53 | 23-9 | 14-1 |
| | Jn98 | 844-818 | 578-580 | 433-445 | 318-341 | 166-195 | 97-107 | 60-56 | 25-9 | 17-1 |
| | St00 | 784-783 | 540-517 | 405-390 | 276-300 | 136-177 | 74-103 | 52-57 | 38-12 | 30-3 |
| 190 | Ab97 | 469-474 | 358-363 | 289-293 | 245-238 | 165-153 | 113-95 | 79-56 | 40-16 | 27-7 |
| | Dz97 | 401-393 | 325-328 | 275-271 | 231-226 | 160-151 | 114-97 | 83-59 | 46-18 | 33-8 |
| | Mr98 | 449-458 | 357-360 | 269-291 | 221-238 | 141-153 | 86-95 | 59-56 | 23-16 | 14-7 |
| | Jn98 | 379-379 | 274-295 | 225-240 | 185-195 | 121-125 | 82-78 | 54-46 | 30-14 | 20-7 |
| | St00 | 358-355 | 277-250 | 232-197 | 176-158 | 110-100 | 69-62 | 45-38 | 31-12 | 21-7 |
| 161 | Ab97 | 362-374 | 279-293 | 233-243 | 194-199 | 127-125 | 83-72 | 52-38 | 26-6 | 22-1 |
| | Dz97 | 375-367 | 289-287 | 249-239 | 215-195 | 150-123 | 99-71 | 62-37 | 28-6 | 20-1 |
| | Mr98 | 523-514 | 402-373 | 320-296 | 250-229 | 133-128 | 76-64 | 46-28 | 23-1 | 18-0 |
| | Jn98 | 771-729 | 487-455 | 346-352 | 249-267 | 126-143 | 66-68 | 42-26 | 27-0 | 16-0 |
| | St00 | 573-570 | 414-370 | 335-290 | 238-223 | 130-123 | 72-61 | 44-26 | 32-1 | 27-0 |
| 162 | Ab97 | 259-277 | 205-213 | 174-174 | 148-138 | 103-82 | 74-46 | 53-23 | 29-5 | 21-3 |
| | Dz97 | 305-317 | 262-269 | 234-225 | 202-186 | 147-120 | 104-71 | 72-38 | 38-7 | 29-2 |
| | Mr98 | 415-394 | 346-313 | 281-258 | 228-208 | 137-125 | 84-68 | 55-33 | 29-4 | 21-0 |
| | Jn98 | 533-535 | 352-379 | 268-297 | 203-227 | 115-123 | 65-60 | 41-25 | 25-0 | 20-0 |
| | St00 | 520-545 | 347-344 | 264-256 | 186-186 | 104-93 | 62-42 | 42-17 | 30-1 | 24-1 |

Quadro 7 – Deflexão medida / deflexão calculada (fase 2)

| Secção N.º | Deflexão medida (µm) - Deflexão calculada (µm) | | | | | | | | | |
|------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|-------|------|
| | Mês | 0 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 210 | 240 |
| 90 | Ab97 | 629-670 | 461-462 | 366-356 | 279-272 | 163-151 | 107-78 | 68-36 | 36-2 | 23-0 |
| | Dz97 | 908-903 | 666-606 | 536-461 | 406-346 | 202-186 | 111-92 | 67-39 | 33-0 | 27-0 |
| | Mr98 | 854-829 | 587-574 | 448-429 | 321-318 | 153-166 | 79-80 | 52-34 | 23-0 | 14-0 |
| | Jn98 | 844-898 | 578-573 | 433-428 | 318-317 | 166-166 | 97-80 | 60-34 | 250 | 17-0 |
| | St00 | 784-816 | 540-500 | 405-367 | 276-268 | 136-138 | 74-66 | 52-28 | 38-1 | 30-0 |
| 190 | Ab97 | 469-443 | 358-367 | 289-305 | 245-253 | 165-163 | 113-98 | 79-54 | 40-10 | 27-1 |
| | Dz97 | 401-402 | 325-345 | 275-289 | 231-242 | 160-161 | 114-99 | 83-57 | 46-12 | 33-3 |
| | Mr98 | 449-437 | 357-348 | 269-288 | 221-237 | 141-151 | 86-89 | 59-48 | 23-8 | 14-1 |
| | Jn98 | 379-373 | 274-298 | 225-246 | 185-201 | 121-128 | 82-76 | 54-42 | 30-8 | 20-2 |
| | St00 | 358-358 | 277-283 | 232-233 | 176-191 | 110-121 | 69-71 | 45-39 | 31-8 | 21-3 |
| 161 | Ab97 | 362-368 | 279-286 | 233-234 | 194-188 | 127-113 | 83-61 | 52-30 | 26-4 | 22-1 |
| | Dz97 | 375-360 | 289-301 | 249-253 | 215-209 | 150-133 | 99-78 | 62-41 | 28-6 | 20-1 |
| | Mr98 | 523-534 | 402-409 | 320-330 | 250-260 | 133-148 | 76-75 | 46-32 | 23-0 | 18-0 |
| | Jn98 | 771-752 | 487-491 | 346-376 | 249-280 | 126-143 | 66-64 | 42-22 | 27-0 | 16-0 |
| | St00 | 573-586 | 414-397 | 335-308 | 238-233 | 130-124 | 72-58 | 44-23 | 32-0 | 27-0 |
| 162 | Ab97 | 259-250 | 205-203 | 174-170 | 148-140 | 103-90 | 74-54 | 53-30 | 29-7 | 21-4 |
| | Dz97 | 305-305 | 262-276 | 234-235 | 202-200 | 147-137 | 104-87 | 72-52 | 38-13 | 29-4 |
| | Mr98 | 415-406 | 346-329 | 281-276 | 228-229 | 137-147 | 84-87 | 55-46 | 29-7 | 21-1 |
| | Jn98 | 533-535 | 352-363 | 268-283 | 203-216 | 115-118 | 65-59 | 41-25 | 25-1 | 20-0 |
| | St00 | 520-535 | 347-363 | 264-283 | 186-216 | 104-118 | 62-59 | 42-25 | 30-1 | 24-0 |

Os módulos correspondentes a cada uma das hipóteses formuladas apresentam diferenças significativas (Quadros 9, 10 e 11).

A diferença de comportamento entre as duas primeiras fases deve-se exclusivamente ao efeito da variação de espessura considerada como representativa da secção. Verifica-se que a uma diminuição da espessura das camadas granulares corresponde um aumento do módulo, quer das camadas granulares, quer das camadas betuminosas (secções 90 e 190). A uma diminuição da espessura da camada betuminosa corresponde um aumento do módulo da camada betuminosa (secção 161), e a um aumento da espessura betuminosa corresponde uma diminuição dos módulos em todas as camadas (secção 162).

Estas considerações não podem ser generalizadas, uma vez que o desempenho de um pavimento depende, entre outros factores, do estado dos materiais que o constituem e da espessura das camadas.

Quadro 8 – Deflexão medida corrigida / deflexão calculada (fase 3)

| Secção N.º | Mês | Deflexão medida (µm) - Deflexão calculada (µm) | | | | | | | | |
|------------|------|--|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-----|
| | | 0 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 210 | 240 |
| 90 | Dz97 | 881-890 | 639-591 | 509-447 | 379-335 | 175-182 | 84-94 | 40-45 | 6-6 | 0-1 |
| | Jn98 | 827-829 | 561-514 | 417-385 | 301-289 | 149-159 | 80-84 | 43-42 | 8-7 | 0-2 |
| 190 | Ab97 | 442-444 | 331-332 | 262-270 | 218-217 | 138-135 | 85-80 | 52-44 | 13-11 | 0-5 |
| | Jn98 | 359-363 | 254-260 | 205-210 | 165-168 | 101-103 | 62-61 | 34-34 | 10-10 | 0-5 |
| 161 | Mr98 | 505-495 | 384-376 | 301-299 | 231-233 | 115-131 | 58-68 | 28-32 | 5-5 | 0-2 |
| | Jn98 | 755-756 | 471-439 | 330-320 | 233-229 | 110-112 | 50-51 | 26-22 | 11-3 | 0-2 |
| 162 | Mr98 | 394-395 | 325-309 | 260-252 | 207-203 | 116-123 | 63-70 | 34-37 | 7-8 | 0-4 |
| | Jn98 | 513-511 | 332-316 | 248-239 | 183-178 | 95-95 | 45-49 | 21-24 | 6-6 | 0-4 |

Quadro 9 – Módulos das secções de estudo (fase 1)

| Secção N.º | Estrutura | | Mês | Módulo (MPa) | | | | Temperatura (° C) | | | |
|------------|-----------|----------|------|--------------|------|---------|----------|-------------------|------|-------|-------|
| | Camada | Esp (cm) | | Cam Bet. | Base | Subbase | Fundação | Tar | Tcam | Tsup. | Hora |
| 90 | CB | 17,9 | Ab97 | 2000 | 200 | 100 | 40 | 17 | 14 | – | – |
| | Base | 32,5 | Dz97 | 1200 | 100 | 70 | 40 | 9,5 | 8,4 | – | 13:10 |
| | Sub-base | 20,8 | Mr98 | 1200 | 100 | 70 | 40 | 23 | 25,6 | – | 16:30 |
| | | | Jn98 | 1800 | 100 | 70 | 40 | 17 | 15 | – | 9:40 |
| | | | St00 | 1300 | 150 | 90 | 40 | – | 40,5 | – | 14:50 |
| 161 | CB | 26 | Ab97 | 3500 | 160 | 0 | 60 | 11 | 13 | – | – |
| | Base | 14,3 | Dz97 | 3500 | 150 | 0 | 60 | 3,9 | 7 | – | 2:25 |
| | | | Mr98 | 1500 | 150 | 0 | 58 | 13 | 13,6 | – | 10:50 |
| | | | Jn98 | 1000 | 150 | 0 | 50 | 23 | 29 | – | 20:15 |
| | | | St00 | 1400 | 175 | 0 | 60 | – | – | 36,7 | 16:40 |
| 162 | CB | 18,8 | Ab97 | 8000 | 300 | 0 | 100 | 18 | 14,7 | – | – |
| | Base | 18,5 | Dz97 | 9000 | 200 | 0 | 60 | 3,9 | 7 | – | 2:05 |
| | | | Mr98 | 6000 | 200 | 0 | 60 | 13 | 13,6 | – | 10:40 |
| | | | Jn98 | 3000 | 200 | 0 | 60 | 23 | 27 | – | 20:40 |
| | | | St00 | 2000 | 220 | 0 | 80 | – | – | 37,4 | 16:55 |
| 190 | CB | 22,2 | Ab97 | 2500 | 180 | 75 | 50 | 17 | 14 | – | – |
| | Base | 35 | Dz97 | 4000 | 180 | 75 | 50 | 9,5 | 8,4 | – | 13:00 |
| | Sub-base | 19 | Mr98 | 4000 | 180 | 75 | 50 | 23 | 26 | – | 16:35 |
| | | | Jn98 | 3500 | 190 | 95 | 65 | 17 | 15 | – | 9:25 |
| | | | St00 | 2800 | 285 | 130 | 80 | – | – | 41,2 | 14:40 |
| 253 | CB | 9 | Ab97 | 6000 | 700 | 270 | 90 | 24,0 | 24,5 | – | – |
| | Base | 30 | Dz97 | 3000 | 570 | 220 | 74 | 18,3 | 18,6 | – | 12:10 |
| | Sub-base | 40 | Mr98 | 1500 | 600 | 230 | 80 | 27,2 | 29,1 | – | 17:15 |
| | | | Jn98 | 3500 | 600 | 240 | 80 | 18,0 | 15,0 | – | 7:20 |
| | | | St00 | 2200 | 550 | 230 | 75 | – | – | 38,9 | 11:35 |

Quadro 10 – Módulos das secções de estudo considerando as novas estruturas (fase 2)

| Secção N.º | Estrutura | | Mês | Módulo (MPa) | | | | Temperatura (°C) | | | Hora |
|------------|-----------|----------|------|--------------|------|---------|----------|------------------|------|------|-------|
| | Camada | Esp (cm) | | Cam. Bet. | Base | Subbase | Fundação | Tar | Tcam | Tsup | |
| 90 | CB | 18 | Ab97 | 2000 | 190 | 95 | 50 | 17 | 14 | – | – |
| | Base | 18 | Dz97 | 1400 | 135 | 70 | 40 | 9,5 | 8,4 | – | 13:10 |
| | Sub-base | 16 | Mr98 | 1100 | 145 | 75 | 45 | 23 | 25,6 | – | 16:30 |
| | | | Jn98 | 1200 | 145 | 75 | 45 | 17 | 15 | – | 9:40 |
| | | | St00 | 1200 | 155 | 90 | 55 | – | 40,5 | – | 14:50 |
| 190 | CB | 23 | Ab97 | 3600 | 190 | 85 | 45 | 17 | 14 | – | – |
| | Base | 15 | Dz97 | 4400 | 200 | 85 | 45 | 9,5 | 8,4 | – | 13:00 |
| | Sub-base | 15 | Mr98 | 3300 | 210 | 90 | 50 | 23 | 26 | – | 16:35 |
| | | | Jn98 | 3900 | 235 | 115 | 60 | 17 | 15 | – | 9:25 |
| | | | St00 | 4000 | 240 | 120 | 65 | – | – | 41,2 | 14:40 |
| 161 | CB | 21,5 | Ab97 | 5000 | 140 | 0 | 70 | 11 | 13 | – | – |
| | Base | 16 | Dz97 | 6200 | 140 | 0 | 55 | 3,9 | 7 | – | 2:25 |
| | Sub-base | 0 | Mr98 | 2700 | 130 | 0 | 50 | 13 | 13,6 | – | 10:50 |
| | | | Jn98 | 1300 | 130 | 0 | 50 | 23 | 29 | – | 20:15 |
| | | | St00 | 2000 | 155 | 0 | 60 | – | – | 36,7 | 16:40 |
| 162 | CB | 22,5 | Ab97 | 7300 | 220 | 0 | 90 | 18 | 14,7 | – | – |
| | Base | 20 | Dz97 | 7800 | 150 | 0 | 50 | 3,9 | 7 | – | 2:05 |
| | Sub-base | 0 | Mr98 | 4800 | 120 | 0 | 50 | 13 | 13,6 | – | 10:40 |
| | | | Jn98 | 2000 | 150 | 0 | 65 | 23 | 27 | – | 20:40 |
| | | | St00 | 2000 | 150 | 0 | 65 | – | – | 37,4 | 16:55 |

Quadro 11 – Módulos das secções de estudo considerando a deflexão corrigida (fase 3)

| Secção N.º | Mês | Módulo (MPa) | | | | Temperatura (°C) | | Hora |
|------------|------|--------------|------|---------|----------|------------------|------|-------|
| | | Cam. Bet. | Base | Subbase | Fundação | Tar | Tcam | |
| 90 | Dz97 | 1400 | 125 | 75 | 45 | 9,5 | 8,4 | 13:10 |
| | Jn98 | 1100 | 185 | 100 | 50 | 17,0 | 15,0 | 9:40 |
| 190 | Ab97 | 2700 | 225 | 120 | 62 | 17,0 | 14,0 | – |
| | Jn98 | 2900 | 310 | 160 | 85 | 17,0 | 15,0 | 9:25 |
| 161 | Mr98 | 2600 | 120 | 0 | 65 | 13,0 | 13,6 | 10:50 |
| | Jn98 | 1000 | 140 | 0 | 70 | 23,0 | 29,0 | 20:15 |
| 162 | Mr98 | 3500 | 150 | 0 | 70 | 13,0 | 13,6 | 10:40 |
| | Jn98 | 1600 | 185 | 0 | 90 | 23,0 | 27,0 | 20:40 |

A diferença de comportamento entre a fase 2 e a fase 3 deve-se possivelmente a erros intrínsecos aos sensores de deflexão ou a uma recuperação lenta da deformação do pavimento. A sua avaliação permite estimar o efeito dos erros do processo de cálculo da vida residual.

Assim, a correcção dos valores de deflexão tem como consequência uma aumento generalizado dos módulos das camadas granulares e do solo de fundação, e uma diminuição considerável dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas, especialmente na secção 162 com uma redução de 1300 MPa.

5. CÁLCULO DA VIDA RESIDUAL

A vida residual define-se como o número de passagens dum eixo de referência que levará um pavimento à ruína, num determinado momento da sua vida. O cálculo da vida

residual em cada momento depende do tráfego passado e do critério de ruína utilizado de acordo com a Equação 1.

$$V_r = N_a - N_p \quad (1)$$

em que:

- N_a = número admissível de passagens correspondente ao critério de dimensionamento condicionante;
 N_p = número de passagens correspondentes ao tráfego passado.

Antes do pavimento entrar ao serviço, o tráfego passado (N_p) é nulo e a vida residual, neste caso definida como vida residual de construção, corresponde ao número total de passagens dum eixo de referência, calculado a partir do critério de ruína condicionante. Este número de passagens pode ser determinado tendo em conta, quer as condições estruturais de projecto, quer as condições estruturais reais, resultantes de um determinado nível de qualidade de construção.

Após o pavimento entrar ao serviço, a capacidade de suportar cargas vai diminuindo ao longo do tempo. A vida residual, neste caso definida como vida residual observada, corresponde ao número de passagens dum eixo de referência que o pavimento suportará a partir dum determinado momento da sua vida útil. Esta calcula-se a partir do critério de ruína condicionante, de fadiga ou de deformação permanente. O número de passagens do eixo de referência reflecte o estado estrutural do pavimento e, conseqüentemente, a evolução dos materiais que o constituem, definidos pela sua deformabilidade naquele momento.

Nos pontos anteriores definiram-se os principais parâmetros que constituem o modelo estrutural que traduz o estado do pavimento em diferentes momentos da sua vida útil.

A partir da análise do modelo estrutural de cada pavimento obtido desta forma determinam-se as extensões de tracção (ϵ_t) na base das camadas betuminosas, e as extensões de compressão (ϵ_z) no topo de solo de fundação. Estas extensões constituem um dos parâmetros dos critérios de ruína.

Os critérios de ruína utilizados são os desenvolvidos pela Shell e adaptados às condições portuguesas por Picado-Santos (1996). Na Equação 2 apresenta-se o critério de fadiga e na Equação 3 o critério de deformação permanente para uma probabilidade de sobrevivência de 95%.

$$N_f = \left(\frac{\epsilon_t}{(0,856 V_b + 1,08) S_{mix}^{-0,36}} \right)^{-5} \times f \quad (2)$$

em que:

- N_f = resistência à fadiga (para 10% da área fendilhada);
 ϵ_t = extensão de tracção;
 S_{mix} = rigidez da mistura betuminosa;
 V_b = volume de betume da mistura betuminosa.
 f = factor de conversão para condições de serviço
 (10 se espessura > 200 mm; 15 se espessura > 100 e < 200 mm).

$$\epsilon_z = 569 \times \left(\frac{N}{10^6} \right)^{\frac{-1}{4}} \quad (3)$$

em que:

- ϵ_z = extensão admissível, em micro-unidades;
 N = número de repetições de carga.

O tráfego é um dos agentes de degradação que maior importância tem no estudo da evolução do desempenho dos pavimentos. Se a evolução do tráfego real for superior à estimada no projecto, em princípio, o pavimento terá uma vida útil inferior. Assim, a análise do tráfego passado real permite aferir se o pavimento apresenta ou não uma redução prematura das suas propriedades mecânicas, comparando a vida residual obtida pela Equação 1 com a vida residual observada.

O tráfego passado (NAEP) utilizado neste estudo e apresentado no Quadro 12 em função dos anos em estudo, baseia-se quer em contagens manuais, quer em contagens automáticas. A partir destas contagens, e com base no manual de dimensionamento da Junta Autónoma de Estradas (JAE; 1995), calculou-se a taxa de crescimento do tráfego, assim como se determinou o factor de agressividade, donde resultou o tráfego acumulado por período de tempo.

No Quadro 13 apresenta-se a vida residual de construção obtida para cada uma das fases acima apresentadas, para o critério dominante. O critério dominante é em todas as secções o critério de deformação permanente, referindo-se os respectivos parâmetros mecânicos à temperatura de serviço calculada com o programa PAVIFLEX (Baptista, 1999). As diferenças da vida residual de construção entre cada uma das fases são demasiado elevadas para se aceitar como válidas as hipóteses consideradas. Assim, o acesso aos dados de projecto é imprescindível para validar qualquer estudo do desempenho dos pavimentos.

A análise da vida residual observada (Quadro 14) só pode ser realizada em cada mês por comparação entre os resultados obtidos nas diferentes fases consideradas. A inexistência de modelos de correcção do módulo de deformabilidade, adequadamente validados para as condições portuguesas, é a razão que impossibilita uma análise fiável da evolução da vida residual ao longo do tempo.

Quadro 12 – Número acumulado de eixos de referência de 80kN por intervalo de tempo

| Sec. Estudo | Ano cons | Número acumulado de eixos padrão de 80kN | | | | | | Total |
|-------------|----------|--|----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | | 87-90 | 90-95 | 95-97 | 97-98 | 98-99 | 99-00 | |
| 90 | 1987 | | | | | | | |
| 190 | | 5276805 | 12150528 | 5862510 | 3124319 | 3260543 | 5954745 | 35629451 |
| 161 | 1993 | | | | | | | |
| 162 | | 162486 | 188340 | 252945 | 262074 | 271560 | 482895 | 1620300 |

Quadro 13 – Vida residual de construção em eixos de 80 kN

| Secção | 90 | | 190 | | 161 | | 162 | |
|--------|---------|-------|---------|-----|---------|------|---------|------|
| | TS (°C) | Vr | TS (°C) | Vr | TS (°C) | Vr | TS (°C) | Vr |
| 1 | 23,98 | 145 | 23,99 | 320 | 27,27 | 9,8 | 27,98 | 1,21 |
| 2 | 23,93 | 20,5 | 24,66 | 40 | 26,47 | 2,94 | 26,41 | 4,97 |
| 3 | 23,93 | 71,86 | 24,66 | 138 | 26,47 | 83 | 26,41 | 21,2 |

Quadro 14 – Vida residual observada em eixos de 80 kN

| Secção | 90 | | | | | 190 | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Ab. 97 | Dz. 97 | Mr. 98 | Jn. 98 | St.00 | Ab. 97 | Dz. 97 | Mr. 98 | Jn. 98 | St.00 |
| 1ª fase | 9,00 | 3,36 | 3,36 | 4,93 | 4,90 | 38,90 | 70,30 | 70,30 | 109,60 | 170,60 |
| 2ª fase | 2,56 | 0,86 | 0,90 | 1,00 | 1,70 | 11,21 | 16,44 | 12,20 | 24,14 | 30,11 |
| 3ª fase | – | 1,12 | – | 1,35 | – | 13,99 | – | – | 34,19 | – |
| Secção | 161 | | | | | 162 | | | | |
| Data | Ab. 97 | Dz. 97 | Mr. 98 | Jn. 98 | St.00 | Ab. 97 | Dz. 97 | Mr. 98 | Jn. 98 | St.00 |
| 1ª fase | 18,80 | 18,80 | 3,20 | 1,20 | 3,10 | 39,70 | 18,30 | 7,94 | 2,27 | 2,38 |
| 2ª fase | 14,60 | 14,40 | 2,00 | 0,50 | 1,70 | 85,00 | 33,40 | 11,70 | 3,70 | 3,70 |
| 3ª fase | – | – | 3,45 | 0,82 | – | – | – | 11,96 | 11,50 | – |

Em todas as secções se verifica que a vida residual tem variações muito elevadas, superiores a 100% em alguns casos, embora inferiores às observadas no Quadro 13. Assim, pequenas variações de espessura traduzem-se numa grande dispersão da vida residual observada. Além disso, pequenas correcções, tal como a efectuada no valor de deflexão observada resulta em grandes alterações na vida residual observada.

6. CONCLUSÕES

Neste estudo fez-se a análise de vários problemas, que permitirá no futuro calcular a vida residual com maior rigor, e assim, definir estratégias de conservação adequadas, evitando tomadas de decisão que se verifiquem desastrosas ao nível da gestão da conservação. Desta análise resultaram quatro conclusões fundamentais:

- 1) A qualidade de construção tem um influência fundamental na vida residual. As diferenças de constituição e de espessura encontradas nas cinco secções estudadas permitem diferentes interpretações do desempenho dos respectivos pavimentos, nomeadamente quanto ao estado dos materiais e quanto à capacidade de suportar cargas, devido à variação significativa dos valores calculados da vida residual.
- 2) Para se poder estudar correctamente a evolução do desempenho dos pavimentos é fundamental aceder-se ao projecto do pavimento, de modo a conhecer-se todas as opções tomadas e todos os cálculos efectuados pelo projectista.
- 3) É essencial conhecer-se a qualidade inicial dos pavimentos, assim como desenvolver-se modelos de correcção dos módulos, de modo a que se constituam referências na evolução do desempenho dos pavimentos.
- 4) É necessário estudar-se as possíveis causas de erro no cálculo da vida residual.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baptista M., Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos Métodos Existentes, 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. Coimbra, 1999.

Decreto Lei n.º. 380/85, de 26 de Setembro de 1985.

Decreto Lei n.º. 222/98, de 17 de Julho de 1998.

Freitas E. F., Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis, Trabalho de síntese apresentado no âmbito das provas de aptidão pedagógica e de capacidade científica. Universidade do Minho. Guimarães, 2001.

JAE, Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional. Almada, 1995.

Matos A., A Observação de Pavimentos na Junta Autónoma de Estradas, Colóquio Sobre Conservação. Junta Autónoma de Estradas, Lisboa, 1997.

Picado-Santos L., Método de Dimensionamento da Shell para Pavimentos Rodoviários Flexíveis (adaptação às condições portuguesas). Departamento de Engenharia Civil - F.C.U.C., 3ª edição. Coimbra, 1996.

Molenaar A.A.A., State of the Art of Pavements Evaluation. Proceedings. The 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. 2, pp 1781-1798. Minneapolis, 1994.