



Universidade do Minho

[CN-06]

**Pais, J.C.**, Pereira, P.A.A.

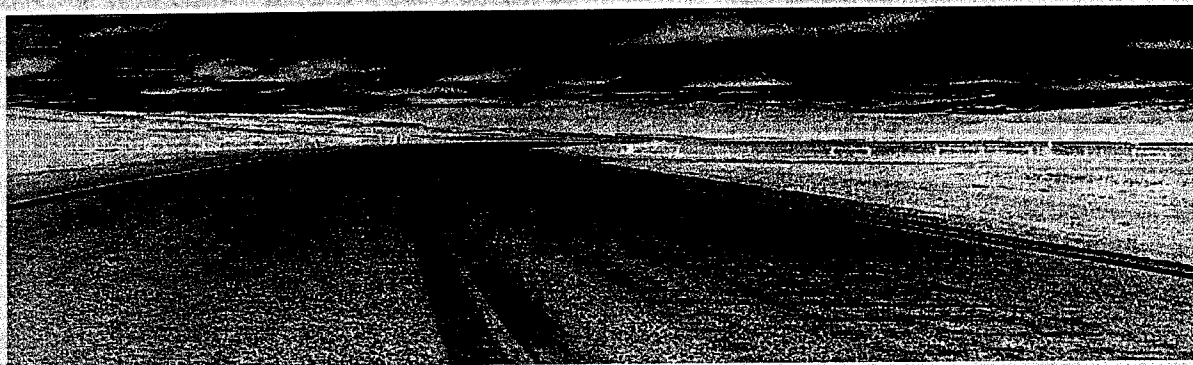
“Avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas”

1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000, Lisboa, 2000, p. 651-

659

**ESTRADA 2000**

**1.º CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS**



**A QUALIDADE RODOVIÁRIA  
NA VIRAGEM DO SÉCULO**

**28 - 30 Novembro 2000**

**Laboratório Nacional de Engenharia Civil**

**CRP.**

CENTRO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS

# AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DAS MISTURAS BETUMINOSAS

JORGE PAIS

Professor Auxiliar da Universidade do Minho

PAULO PEREIRA

Professor Associado da Universidade do Minho

## RESUMO

Neste artigo é realizada uma abordagem ao modo de obtenção de leis de fadiga para a caracterização de misturas betuminosas em laboratório, recorrendo ao ensaio de flexão em 4 pontos realizado em deslocamento controlado.

O objectivo deste trabalho prende-se com a definição dos procedimentos de realização dos ensaios para obtenção da resistência à fadiga, nomeadamente o número de níveis de ensaio e repetições para cada nível, tendo-se para o efeito avaliado a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, recorrendo a 36 ensaios, e procedido a uma análise combinatória destes resultados.

## 1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um pavimento consiste na definição de uma estrutura que assegure a função estrutural e funcional definida em função de padrões de qualidade estabelecidos para cada pavimento. A função estrutural está ligada à capacidade que o conjunto das diversas camadas tem para resistir às cargas aplicadas pelos veículos e às acções climáticas, sem sofrer degradações que ponham em risco a funcionalidade do pavimento. A função funcional está relacionada com as características de segurança e conforto da superfície da camada de desgaste do pavimento (Pais, 1999).

Com a experiência adquirida através dos anos, foram desenvolvidos vários métodos para o dimensionamento dos pavimentos, entre eles, os métodos

racionais que actualmente são considerados como os mais adequados para o dimensionamento de pavimentos.

O dimensionamento de um pavimento recorrendo aos métodos racionais, consiste em calcular o estado de tensão e deformação devido ao tráfego, fixada a geometria e as propriedades dos materiais que constituem o pavimento, verificando-se em seguida os critérios de ruína considerados no pavimento (Azevedo, 1993).

Os critérios de ruína para o fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas é verificados recorrendo a leis de fadiga realizadas com base em ensaios laboratoriais.

Um dos mais utilizados ensaios laboratoriais é o de flexão em 4 pontos sobre vigas prismáticas cuja dimensão é função da dimensão do agregado utilizado na mistura betuminosa.

Função do tipo de ensaio e do tipo de mistura betuminosa, os resultados laboratoriais de resistência à fadiga apresentam dispersão.

Interessa pois saber qual o número de ensaios que devem ser realizados para obter a caracterização da resistência à fadiga da mistura betuminosa com um grau de fiabilidade compatível com o exigido aos pavimentos rodoviários.

Uma vez que a avaliação da resistência à fadiga numa mistura betuminosa é realizada recorrendo a leis de fadiga em que se utilizam ensaios a diversos níveis de extensão utilizados para extrapolar a resistência à fadiga para o nível desejado, o problema da determinação do número de ensaios a realizar transforma-se num problema de determinação do número de níveis de extensão a ensaiar e na determinação do número de repetições para cada ensaio.

Como uma lei de fadiga é traduzida por uma recta num referencial (Log N, Log  $\epsilon$ ) a realização de apenas dois níveis poderá ser suficiente para a sua definição. No entanto, a utilização de mais um nível poderá contribuir para o aumento da fiabilidade da lei de fadiga.

Assim, neste trabalho será avaliada se a utilização de 3 níveis de ensaios contribui de forma significativa para a caracterização da resistência à fadiga das misturas betuminosas.

Quanto à utilização de 2 níveis de ensaios, torna-se importante definir, de uma forma qualitativa, o valor da extensão a utilizar uma vez que poder-se-á realizar ensaios a altos, médios e baixos níveis de extensão, cada um destes conduzindo a diferentes custos de ensaio.

Deste modo, o trabalho pretende definir o número de níveis a utilizar nos ensaios de fadiga por flexão, nomeadamente 2 ou 3 e para o caso de dois níveis,

# AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DAS MISTURAS BETUMINOSAS

JORGE PAIS

*PROFESSOR AUXILIAR, UNIVERSIDADE DO MINHO*

PAULO PEREIRA

*PROFESSOR ASSOCIADO, UNIVERSIDADE DO MINHO*

## RESUMO

Neste artigo é realizada uma abordagem ao modo de obtenção de leis de fadiga para a caracterização de misturas betuminosas em laboratório, recorrendo ao ensaio de flexão em 4 pontos realizado em deslocamento controlado.

O objectivo deste trabalho prende-se com a definição dos procedimentos de realização dos ensaios para obtenção da resistência à fadiga, nomeadamente o número de níveis de ensaio e repetições para cada nível, tendo-se para o efeito avaliado a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, recorrendo a 36 ensaios, e procedido a uma análise combinatória destes resultados.

## 1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um pavimento consiste na definição de uma estrutura que assegure a função estrutural e funcional definida em função de padrões de qualidade estabelecidos para cada pavimento. A função estrutural está ligada à capacidade que o conjunto das diversas camadas tem para resistir às cargas aplicadas pelos veículos e às acções climáticas, sem sofrer degradações que ponham em risco a funcionalidade do pavimento. A função funcional está relacionada com as características de segurança e conforto da superfície da camada de desgaste do pavimento (Pais, 1999).

Com a experiência adquirida através dos anos, foram desenvolvidos vários métodos para o dimensionamento dos pavimentos, entre eles, os métodos racionais que actualmente são considerados como os mais adequados para o dimensionamento de pavimentos.

O dimensionamento de um pavimento recorrendo aos métodos racionais, consiste em calcular o estado de tensão e deformação devido ao tráfego, fixada a geometria e as propriedades dos materiais que constituem o pavimento, verificando-se em seguida os critérios de ruína considerados no pavimento (Azevedo, 1993).

Os critérios de ruína para o fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas é verificados recorrendo a leis de fadiga realizadas com base em ensaios laboratoriais.

Um dos mais utilizados ensaios laboratoriais é o de flexão em 4 pontos sobre vigas prismáticas cuja dimensão é função da dimensão do agregado utilizado na mistura betuminosa.

Função do tipo de ensaio e do tipo de mistura betuminosa, os resultados laboratoriais de resistência à fadiga apresentam dispersão.

Interessa pois saber qual o número de ensaios que devem ser realizados para obter a caracterização da resistência à fadiga da mistura betuminosa com um grau de fiabilidade compatível com o exigido aos pavimentos rodoviários.

Uma vez que a avaliação da resistência à fadiga duma mistura betuminosa é realizada recorrendo a leis de fadiga em que se utilizam ensaios a diversos níveis de extensão utilizados para extrapolar a resistência à fadiga para o nível desejado, o problema da determinação do número de ensaios a realizar transforma-se num problema de determinação do número de níveis de extensão a ensaiar e na determinação do número de repetições para cada ensaio.

Como uma lei de fadiga é traduzida por uma recta num referencial ( $\log N$ ,  $\log \epsilon$ ) a realização de apenas dois níveis poderá ser suficiente para a sua definição. No entanto, a utilização de mais um nível poderá contribuir para o aumento da fiabilidade da lei de fadiga.

Assim, neste trabalho será avaliada se a utilização de 3 níveis de ensaios contribui de forma significativa para a caracterização da resistência à fadiga das misturas betuminosas.

Quanto à utilização de 2 níveis de ensaios, torna-se importante definir, de uma forma qualitativa, o valor da extensão a utilizar uma vez que poder-se-á realizar ensaios a altos, médios e baixos níveis de extensão, cada um destes conduzindo a diferentes custos de ensaio.

Deste modo, o trabalho pretende definir o número de níveis a utilizar nos ensaios de fadiga por flexão, nomeadamente 2 ou 3 e para o caso de dois níveis, definir quais os níveis de extensão. Para estes casos pretende-se definir o número de repetições de ensaio.

## 2. MISTURA BETUMINOSA UTILIZADA

Para a realização deste trabalho foi utilizada uma mistura betuminosa com granulometria de 0/25 tendo sido utilizado um betume convencional do tipo 10/20. A mistura produzida em central foi compactada *in situ* com cilindros convencionais da qual foi retirada uma laje que permitiu a realização de 36 vigas prismáticas com as dimensões 38,1 x 6,3 x 5,1 cm<sup>3</sup>, a utilizar nos ensaios laboratoriais de resistência à fadiga.

Para cada viga foi determinado o volume de vazios e teor em betume que se apresentam na Tabela 1.

**Tabela 1 – Volume de vazios e teor em betume para as vigas utilizadas nos ensaios laboratoriais**

Viga	T.Bet (%)	Vazios (%)	Viga	T.Bet (%)	Vazios (%)	Viga	T.Bet (%)	Vazios (%)
V1	6.45	6.1	V13	6.60	3.7	V25	6.68	8.2
V2	6.36	5.7	V14	6.90	4.9	V26	6.54	5.7
V3	6.32	3.7	V15	6.35	3.7	V27	7.09	5.7
V4	6.39	5.3	V16	6.68	4.9	V28	6.54	3.7
V5	6.80	6.1	V17	6.65	5.7	V29	6.40	5.3
V6	6.83	6.1	V18	6.52	6.9	V30	6.48	7.8
V7	6.56	5.3	V19	6.39	4.9	V31	6.47	6.1
V8	6.34	5.7	V20	6.60	5.7	V32	6.59	8.2
V9	6.60	5.7	V21	6.34	5.3	V33	5.97	6.1
V10	6.38	6.1	V22	6.55	7.8	V34	6.76	5.3
V11	6.51	3.7	V23	6.41	5.7	V35	6.66	6.5
V12	6.54	5.7	V24	6.71	5.7	V36	6.43	6.1

## 3. PROGRAMA E RESULTADOS DOS ENSAIOS

As 36 vigas disponíveis foram ensaiadas utilizando o ensaio de flexão em 4 pontos a uma temperatura de 20 °C e uma frequência de 10 Hz. Os ensaios foram realizados a 3 níveis de extensão (200E-6 (baixo), 400E-6 (médio), 800E-6 (alto)) tendo-se realizado 12 ensaios para cada nível. Na Tabela 2 são apresentados os resultados laboratoriais das 36 vigas utilizadas, nomeadamente no que respeita à resistência à fadiga, extensão, módulo de rigidez e ângulo de fase.

Estes resultados da resistência à fadiga podem ser representados sobre a forma de recta de fadiga tal como se apresenta na Figura 1, correspondendo à lei de fadiga da Equação 1.

$$N = 3.1470E16 \varepsilon^{-4.2986}, R^2 = 0.95$$

(3)

sendo:

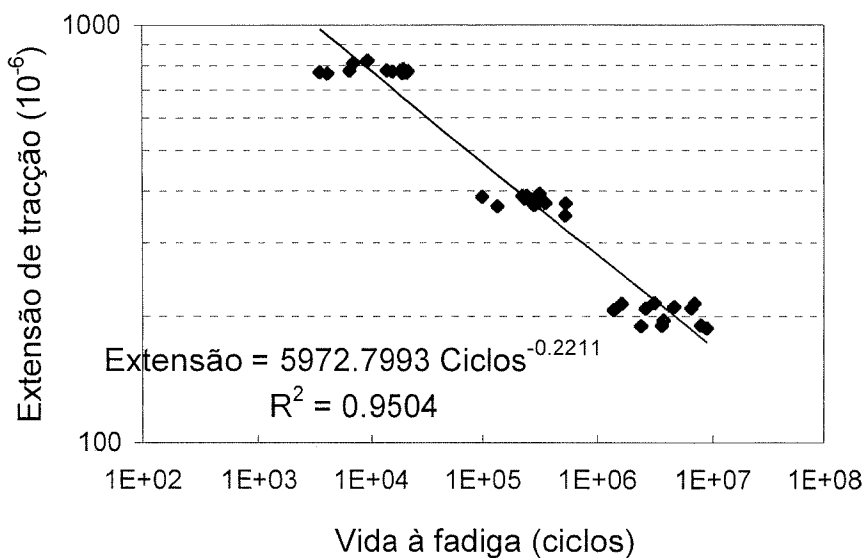
 $N$  = resistência à fadiga; $\varepsilon$  = extensão de tracção ( $10^{-6}$ );**Tabela 2 – Resultados dos ensaios à fadiga**

Viga	Módulo de Rigidez (MPa)	Ângulo de fase (graus)	Extensão ( $10^{-6}$ )	Resistência à fadiga (ciclos)
V1	9 500	9.2	187	8 885 531
V2	9 596	12.8	190	2 395 171
V3	12 417	9.5	190	3 604 947
V4	9 368	9.2	191	7 908 946
V5	9 141	9.2	196	3 726 882
V6	8 754	9.0	207	1 391 516
V7	9 592	9.4	209	2 622 842
V8	8 202	12.4	209	6 492 919
V9	9 276	8.9	211	4 605 051
V10	8 636	11.2	215	1 624 192
V11	8 491	9.7	215	6 942 841
V12	8 099	8.7	215	3 092 087
V13	9 265	9.8	349	539 265
V14	11 620	13.9	367	137 320
V15	9 875	10.0	370	287 723
V16	8 149	10.5	373	545 818
V17	8 736	10.3	373	311 215
V18	8 858	10.3	374	358 056
V19	8 875	9.7	380	267 986
V20	8 460	9.8	383	237 918
V21	9 112	9.6	387	100 225
V22	9 079	10.1	389	226 565
V23	9 341	10.4	389	248 266
V24	8 631	9.9	393	321 661
V25	11 030	15.6	767	4 148
V26	6 624	9.4	769	19 513
V27	7 577	11.2	770	21 314
V28	11 184	14.7	772	3 574
V29	7 591	9.7	775	15 588
V30	7 114	10.3	778	21 702
V31	7 093	10.1	779	18 742
V32	7 237	11.1	780	6 505
V33	7 962	10.2	781	13 853
V34	7 460	10.0	786	19 991
V35	7 553	10.8	812	7 031
V36	7 263	11.1	824	9 339



A lei de fadiga definida com os 36 ensaios, 12 a cada nível, apresenta um elevado coeficiente de correlação ( $R^2=0.95$ ) permitindo garantir que a resistência à fadiga assim definida corresponde ao valor mais fiável da resistência à fadiga da mistura betuminosa.

A título de exemplo e para utilizações futuras, foi calculada a resistência à fadiga para uma extensão de  $100E-6$ , apresentando o valor de  $108E6$  ciclos, ao qual se irá designar por resistência à fadiga correcta.



**Figura 1 – Lei de fadiga da mistura betuminosa**

#### **4. ANÁLISE COMBINATÓRIA DA RESISTÊNCIA À FADIGA**

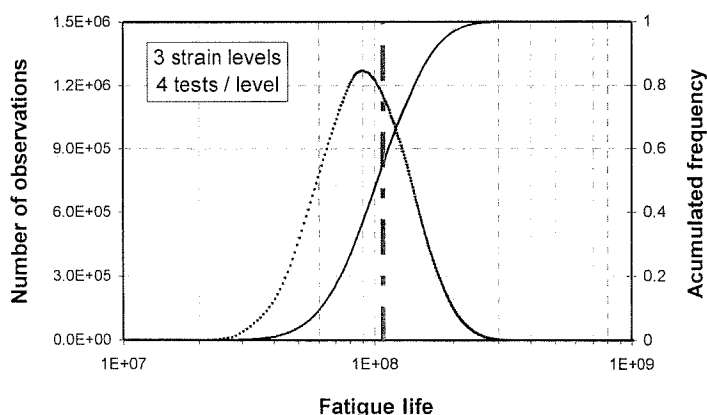
Para a determinação do número de níveis de extensão e repetições a utilizar na realização de ensaios laboratoriais de avaliação da resistência à fadiga foi utilizada uma análise combinatória em que se calculou a resistência à fadiga para cada combinação possível dos resultados dos ensaios laboratoriais.

Na Tabela 3 é possível observar a quantidade de combinações que se podem realizar utilizando todos os 36 ensaios, tanto considerando os 3 níveis como no caso de se utilizarem apenas 2, sendo interessante constatar que é possível realizar quase 800 milhões de combinações de resultados para o caso de se utilizar 3 níveis de extensão com 6 repetições por nível.

**Tabela 3 – Número de combinações possíveis dos resultados disponíveis**

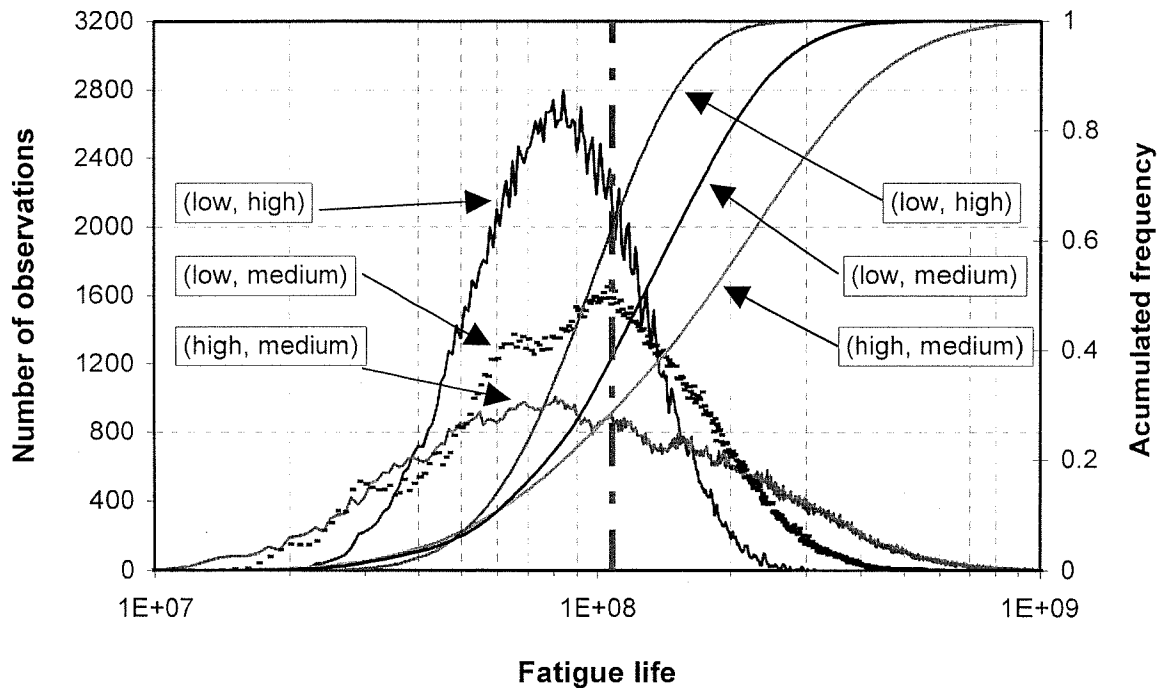
Repetições por nível	2 níveis	3 níveis
1	432	1.73E+03
2	13068	2.87E+05
3	145200	1.06E+07
4	735075	1.21E+08
5	1881792	4.97E+08
6	2561328	7.89E+08
7	1881792	4.97E+08
8	735075	1.21E+08
9	145200	1.06E+07
10	13068	2.87E+05
11	432	1.73E+03
12	3	1.00E+00

Para concluir do número de níveis de ensaio e do número de repetições a realizar nos ensaios de fadiga em 4 pontos foi calculada a resistência à fadiga, para a extensão de  $100E-6$ , para cada uma das combinações que se indicam na Tabela 3. Na Figura 2 encontra-se a distribuição da resistência à fadiga e a frequência acumulada para o caso de 4 repetições para cada um dos 3 níveis de ensaio, enquanto que na Figura 3 encontra-se a mesma informação para o caso de 2 níveis, o qual inclui as 3 combinações de níveis disponíveis (alto e baixo; médio e alto; médio e alto).



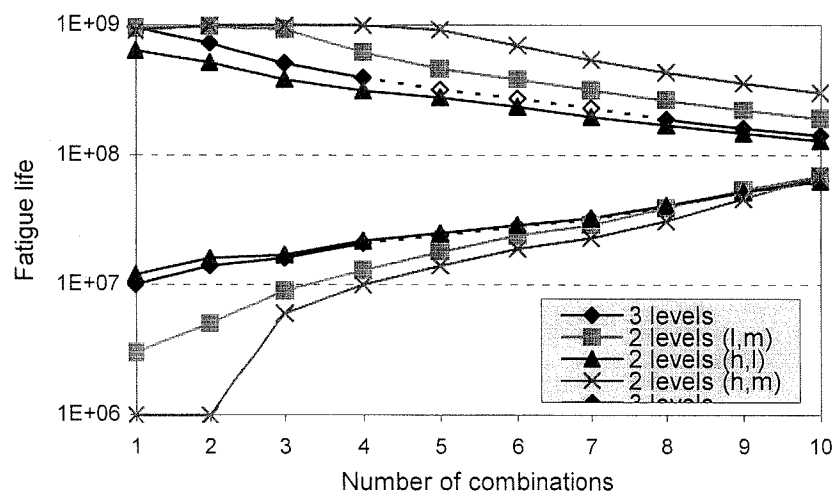
**Figura 2 – Resistência à fadiga utilizando 3 níveis de extensão e 4 repetições por nível**

Da análise da resistência à fadiga para as combinações de 4 ensaios é possível concluir que tanto o valor mais frequente da resistência à fadiga como a mediana da distribuição nem sempre correspondem ao valor considerado como correcto.



**Figura 3 – Resistência à fadiga utilizando 2 níveis de extensão e 4 repetições por nível**

Verifica-se no entanto uma significativa diminuição do intervalo de valores obtidos, à medida que se aumenta o número de repetições como se pode verificar pela análise da Figura 4. Mesmo assim, verifica-se que para o caso de 10 repetições para os níveis alto e médio, a resistência à fadiga pode variar desde 69 milhões a 304 milhões, ou seja, pode variar desde metade até 3 vezes o valor correcto da resistência à fadiga.

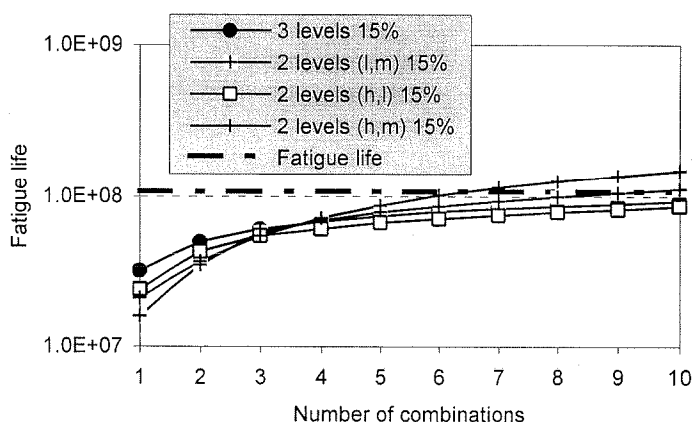


**Figura 4 – Valores máximos e mínimos da resistência à fadiga para as várias combinações**

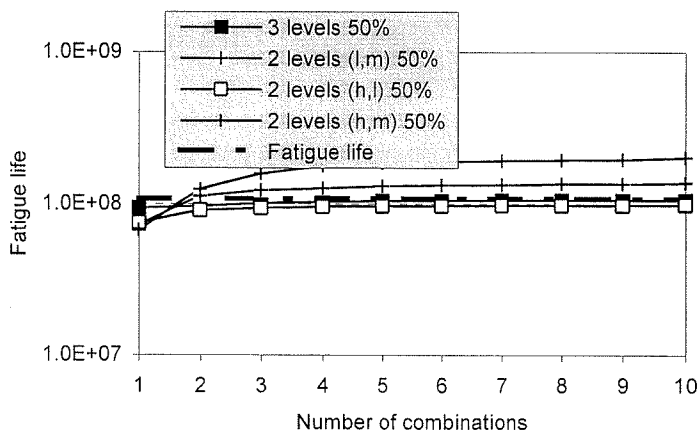
Para a definição do número de repetições e do número de nível a utilizar nos ensaios de fadiga foi avaliada a resistência à fadiga correspondente aos percentis 15% e 50%, tal como se apresenta nas Figuras 5 e 6.

A análise dos resultados do percentil 15% permitem concluir que para se obter a resistência à fadiga correcta são necessários pelo menos 7 ensaios realizados aos níveis alto e médio. Como se constata, a realização de 3 níveis de extensões bem como dois níveis (alto e baixo) não permite obter o valor desejado para a resistência à fadiga. A utilização dos níveis médio e baixo permite atingir o valor correcto apenas com 10 repetições.

Se a fiabilidade pretendida para os resultados da resistência à fadiga for menor, como é o caso do percentil 50% em que metade dos ensaios apresentam um valor inferior ao correcto, então a realização de 2 níveis (alto e médio) ou (baixo e médio) seria o necessário. Neste caso a utilização de 3 níveis parece não contribuir significativamente para o aumento da fiabilidade da avaliação da resistência à fadiga desta mistura betuminosa.



**Figura 5 – Resistência à fadiga correspondente ao percentil 15%**



**Figura 6 – Resistência à fadiga correspondente ao percentil 50%**

#### **4. CONCLUSÕES**

Os resultados na análise combinatória da resistência à fadiga da mistura betuminosa utilizada permitiram concluir, que o número de repetições bem como o número de nível de extensões utilizados, influenciam consideravelmente a avaliação da resistência à fadiga.

A obtenção do valor mais plausível da resistência à fadiga só é obtido num número muito pequeno de situações, havendo um aumento da dispersão com a diminuição do número de repetições de ensaio. Esta dispersão pode tomar proporções consideráveis mesmo para um elevado número de repetições. Exemplo disto foi o caso apresentado para 10 repetições em que a resistência à fadiga variou desde 69 milhões a 304 milhões.

Tendo por base os resultados disponíveis, e utilizando um grau de fiabilidade de 85%, pode concluir-se que para se obter a resistência à fadiga correcta são necessários cerca de 7 ensaios realizados aos níveis alto e médio.

Constatou-se da análise realizada que a utilização de 3 níveis de extensão não contribui para um aumento da fiabilidade da resistência à fadiga quando comparada com a utilização de 2 níveis (alto e médio).

Esta análise foi realizada tendo como base os resultados da resistência à fadiga de apenas uma mistura betuminosa pelo que a repetição deste estudo para outras misturas betuminosas se configura muito importante. Só nesse caso se poderá fundamentar as conclusões obtidas neste estudo.

#### **AGRADECIMENTOS**

Ao aluno João Barros, da Licenciatura em Engenharia Civil da Universidade do Minho, os autores desejam manifestar o seu agradecimento pelo apoio prestado.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] - Pais, J. “Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 1999.

[2] - Azevedo, M. “Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos”, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, 1993.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados na análise combinatória da resistência à fadiga da mistura betuminosa utilizada permitiram concluir, que o número de repetições bem como o número de nível de extensões utilizados, influenciam consideravelmente a avaliação da resistência à fadiga.

A obtenção do valor mais plausível da resistência à fadiga só é obtido num número muito pequeno de situações, havendo um aumento da dispersão com a diminuição do número de repetições de ensaio. Esta dispersão pode tomar proporções consideráveis mesmo para um elevado número de repetições. Exemplo disto foi o caso apresentado para 10 repetições em que a resistência à fadiga variou desde 69 milhões a 304 milhões.

Tendo por base os resultados disponíveis, e utilizando um grau de fiabilidade de 85%, pode concluir-se que para se obter a resistência à fadiga correcta são necessários cerca de 7 ensaios realizados aos níveis alto e médio.

Constatou-se da análise realizada que a utilização de 3 níveis de extensão não contribui para um aumento da fiabilidade da resistência à fadiga quando comparada com a utilização de 2 níveis (alto e médio).

Esta análise foi realizada tendo como base os resultados da resistência à fadiga de apenas uma mistura betuminosa pelo que a repetição deste estudo para outras misturas betuminosas se configura muito importante. Só nesse caso se poderá fundamentar as conclusões obtidas neste estudo.

#### AGRADECIMENTOS

Ao aluno João Barros, da Licenciatura em Engenharia Civil da Universidade do Minho, os autores desejam manifestar o seu agradecimento pelo apoio prestado.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PAIS, Jorge C. – “Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 1999.
- [2] AZEVEDO, Maria da Conceição M. – “Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos”, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, 1993.