

INFLUÊNCIA DO TIPO DE AGREGADO E LIGANTE NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

JORGE PAIS

PROFESSOR AUXILIAR, DEP. ENG. CIVIL DA UNIVERSIDADE DO MINHO

PAULO FONSECA

GERENTE DA RECIPAV – ENGENHARIA E PAVIMENTOS, LDA.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo em que é avaliado o comportamento mecânico de misturas betuminosas com dois tipos de agregados (dioritos e seixo britado), produzidas com betume modificado com borracha e betume convencional com penetração 35/50.

O comportamento mecânico foi avaliado recorrendo a ensaios de fadiga por flexão em 4 pontos e ensaios de pista, ambos realizados sobre provetes com e sem condicionamento para simular o envelhecimento de longo prazo.

Este estudo permitiu avaliar a diferença de comportamentos dos tipos de agregados em análise. A comparação do desempenho laboratorial relativamente a modelos de comportamento existentes e propriedades físicas das misturas, permitiu retirar importantes conclusões sobre o comportamento das misturas betuminosas.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos utiliza as propriedades mecânicas dos materiais e o seu comportamento em serviço, para obter uma estrutura de pavimento que resista, durante a vida de projecto, às acções previstas que lhe são aplicadas. A teoria da elasticidade aplicada a estruturas com várias camadas permite obter a resposta do pavimento às acções aplicadas. Esta resposta, avaliada através das extensões previstas nos diversos materiais constituintes do pavimento, é utilizada para prever a ruína do pavimento baseada em leis de fadiga obtidas em ensaios laboratoriais [1].

O dimensionamento de um pavimento, através de um método empirico-mecanicista, utiliza como critérios de ruína a extensão vertical de compressão no topo da camada de fundação, como critério de ruína para controlar a deformação permanente do pavimento e a extensão horizontal de tracção na base das camadas betuminosas, de modo a controlar o fendilhamento por fadiga. Estas extensões estão representadas esquematicamente na Figura 1.

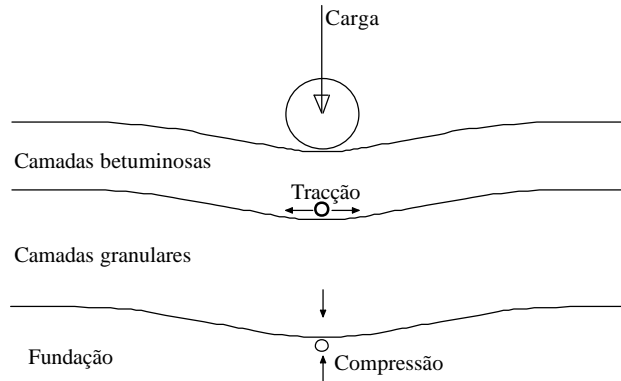


Figura 1. Extensões de tracção e compressão usadas como critérios de ruína

O dimensionamento de um pavimento consiste então 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 dimensionamento [2].

1.1. Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas

Em termos estruturais, as misturas betuminosas são caracterizadas pelo seu módulo de deformabilidade e ângulo de fase.

O módulo de deformabilidade de uma mistura betuminosa depende da temperatura e do tempo de carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos. Usualmente, a quantificação do módulo de deformabilidade é avaliada através de ensaios laboratoriais pela aplicação de um carregamento sinusoidal da seguinte forma:

$$S = S_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

A resposta do material à solicitação aplicada resulta numa deformação que segue uma lei caracterizada pela mesma frequência, mas apresentando um desfasamento em relação à carga, de acordo com a Equação 2. A este desfasamento é atribuído o nome de ângulo de fase (ϕ).

$$e = e_0 \sin(\omega t - f) \quad (2)$$

O quociente entre a tensão aplicada e a extensão produzida define o módulo complexo da mistura betuminosa, podendo este ser apresentado pelas suas componentes real e imaginária, segundo a Equação 3.

$$E^* = |E^*| (\cos f + i \sin f) \quad (3)$$

O módulo complexo pode também ser apresentado pelo seu valor em módulo $|E^*|$, habitualmente designado de módulo de deformabilidade, e pelo seu ângulo de fase (ϕ), respectivamente de acordo com as Equações 4 e 5.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (4)$$

$$f = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (5)$$

1.2. Resistência à fadiga das misturas betuminosas

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é a capacidade que elas apresentam para resistir a esforços de flexões repetidos sem atingir a rotura. O fendilhamento por fadiga é um dos principais mecanismos de ruína dos pavimentos e manifesta-se pelo aparecimento de fendas provocado pela cargas repetidas do tráfego.

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é geralmente expressa como uma relação entre a tensão ou extensão inicial e o número de repetições de carga que produzem a ruína. Este número é habitualmente determinado usando ensaios laboratoriais de flexão repetida, realizados a determinados níveis de tensão ou extensão.

O carregamento pode ser aplicado em tensão controlada, em que a carga ou a amplitude da tensão permanece constante durante o ensaio, ou em extensão controlada, onde a deformação ou a amplitude da extensão são mantidas constantes durante o ensaio.

A resistência à fadiga é dependente do modo de carregamento. Nos ensaios realizados em tensão controlada, a rotura é bem definida uma vez que estes apresentam fendas que se desenvolvem até à rotura. Nos ensaios de extensão controlada, a rotura não é visível pelo que se convencionou que a mistura betuminosa atingiu a rotura quando o seu módulo de deformabilidade inicial foi reduzido em 50%, tal como se apresenta na Figura 2.

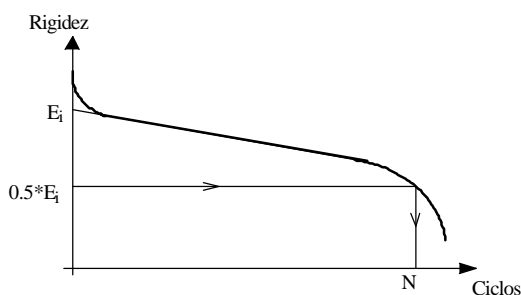


Figura 2. Definição da rotura em ensaios de flexão em extensão controlada

Nos ensaios em extensão controlada, a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, pode ser caracterizada função da extensão aplicada, de acordo com a Equação 6.

$$N = a \left(\frac{1}{\epsilon_0} \right)^b \quad (6)$$

sendo: N = resistência à fadiga da mistura betuminosa;
ε₀ = extensão de tracção;
a, b = coeficientes determinados experimentalmente.

1.3. Resistência aos cavados de rodeira das misturas betuminosas

Para complementar o estudo da comparação do comportamento das misturas betuminosas, e uma vez que as misturas com seixo britado apresentaram um excelente comportamento à fadiga, foram realizados ensaio de pista para avaliar a resistência aos cavados de rodeira.

Estes ensaios foram realizados nas misturas SCN e DBN, de acordo com a norma NLT 173-94 sendo os ensaios realizados a 60 °C aplicando-se uma pressão de contacto de 700 kPa, tal como preconizado na norma BS 598-110:1998 de onde a norma NLT deriva.

2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS MISTURAS BETUMINOSAS

A comparação do comportamento mecânico de misturas betuminosas com diferentes tipos de agregado (diorito e seixo britado) e diferentes tipos de betume (convencional 35/50 e BMB - betume modificado com borracha), com simulação do envelhecimento de longo prazo da mistura, foi realizado utilizando 5 configurações de materiais de acordo com a Tabela 1.

A nomenclatura utilizada para as misturas corresponde à inicial do agregado, betume e envelhecimento da mistura.

Tabela 1. Configurações das misturas betuminosas estudadas

Mistura betuminosa	Agregado	Betume	Ensaio após envelhecimento
DBN	Diorito	BMB	Não
SCN	Seixo britado	Conv. 35/50	Não
SBN	Seixo britado	BMB	Não
SCS	Seixo britado	Conv. 35/50	Sim
DBS	Diorito	BMB	Sim

Os provetes de ensaio foram obtidos por serragem de lajes retiradas do pavimento de duas estradas.

O envelhecimento aplicado às misturas betuminosas foi o preconizado pelo programa SHRP, em que o envelhecimento de longo prazo da mistura betuminosa é simulado pelo condicionamento da mistura em estufa a 85 °C durante 5 dias.

Os provetes utilizados nos ensaios laboratoriais foram caracterizados fisicamente através da medição da porosidade e da percentagem em betume.

A porosidade foi obtida medindo a massa volúmica máxima teórica da mistura e a massa volúmica aparente de cada provete de ensaio. A massa volúmica aparente foi medida, antes dos ensaios de fadiga, recorrendo à pesagem dentro e fora de água com o provete envolvido em película plástica (parafilm). A massa volúmica máxima teórica resultou da média de duas medições a conjuntos de duas vigas após os ensaios de fadiga.

A percentagem de betume foi obtida após os ensaios de fadiga recorrendo à incineração da mistura betuminosa em mufla, a temperaturas da ordem dos 550 °C, durante aproximadamente 30 minutos. Nas misturas com betume modificado com borracha o tempo de incineração foi da ordem dos 60 minutos.

Na Tabela 2 apresenta-se a média da porosidade e da percentagem de betume dos provetes ensaiados.

Tabela 2. Porosidade a percentagem de betume dos provetes ensaiados

Mistura betuminosa	Porosidade (%)	Percentagem de Betume
DBN	4.7	8.0
SCN	3.3	5.6
SBN	2.6	8.5
SCS	3.8	5.1
DBS	5.7	8.4

3. MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DAS MISTURAS BETUMINOSAS

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas foi obtido através do ensaio de flexão em 4 pontos, com carregamento sinusoidal repetido, sobre provetes com a dimensão de 5.1 x 6.3 x 38.0 cm, de acordo com o preconizado na norma AASHTO TP8-94, tendo-se aplicado uma extensão máxima de tração na base do provete de $100 \cdot 10^{-6}$. Os ensaios foram conduzidos em ordem decrescente de frequência tendo-se aplicado 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2 e 0.1 Hz, para a temperatura de ensaio de 20 °C.

A comparação dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das várias misturas encontram-se respectivamente nas Figuras 3 e 4.

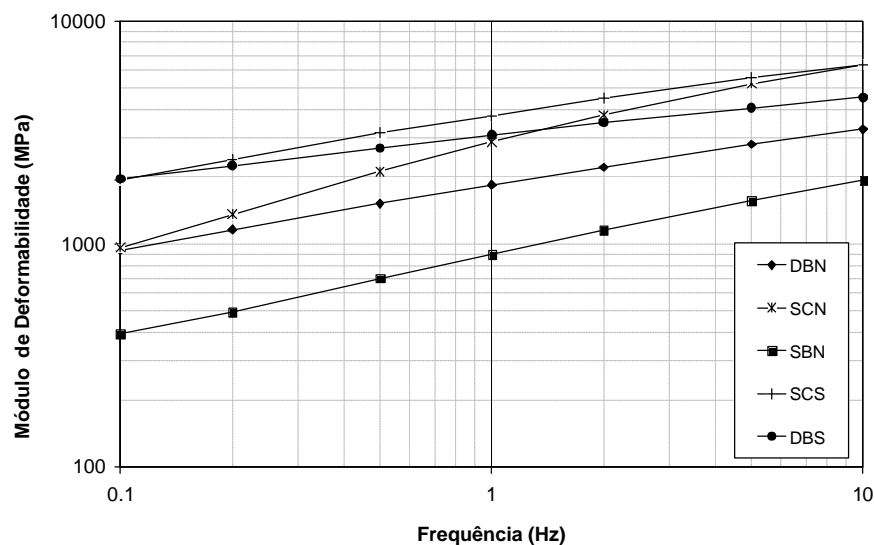


Figura 3. Módulo de deformabilidade das misturas estudadas

Os módulos de deformabilidade obtidos para as misturas com betume modificado com borracha sem envelhecimento (DBN e SBN) apresentam para a frequência de 10 Hz, respectivamente o valor de 3266 e 1929 MPa. Estes módulos correspondem aos extremos da gama normal de módulos para misturas com este tipo de ligante.

A mistura com seixo britado e betume convencional antes de envelhecimento (mistura SCN) apresenta módulo de 6350 MPa a 10Hz podendo ser considerado um valor médio para misturas com este tipo de ligante (betume convencional do tipo 35/50).

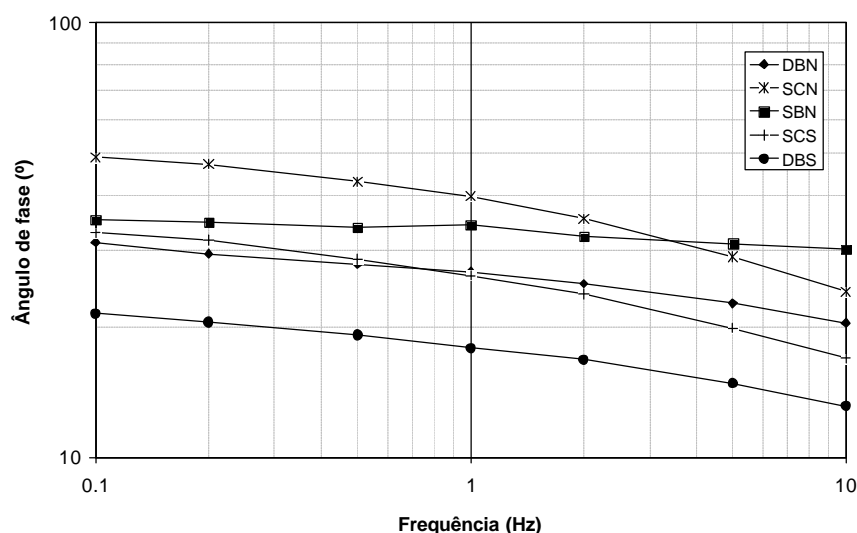


Figura 4. Ângulo de fase das misturas estudadas

Em termos de ângulo de fase, é de salientar o elevado valor apresentado pelas misturas com seixo britado, tanto as misturas com betume convencional, com 24.0 e 24.9 graus, como a mistura com betume modificado com borracha, com 30.1 graus. As misturas com agregado diorito e betume modificado com borracha com um ângulo de fase de 20.4 e 13.1 graus, respectivamente para o caso de sem e com envelhecimento, apresentam um ângulo de fase normal para este tipo de misturas betuminosas.

4. RESISTÊNCIA À FADIGA DAS MISTURAS BETUMINOSAS

A resistência à fadiga das misturas betuminosas foi obtida recorrendo a ensaios de fadiga por flexão em pontos 4, de acordo com a norma AASHTO TP8-94, conduzidos a 20 °C, sendo a frequência de aplicação de cargas de 10 Hz. Os ensaios foram desenvolvidos em controlo de deslocamento tendo-se realizado 3 repetições para cada um dos 2 níveis de níveis de extensão ensaiados, aproximadamente 300 e 700E-6, obtidos através de um carregamento sinusoidal sem período de repouso.

Na Figura 5 são apresentadas as leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas podendo-se observar que as misturas com betume modificado com borracha apresentam mais vida à fadiga que as misturas com betume convencional. Esta constatação, em relação à mistura DBN apenas é válida para o nível elevado de extensão, já que para o nível baixo de extensão, a mistura apresentou uma menor vida à fadiga.

A diferença de vida à fadiga entre a mistura SBN e DBN parece ser devida ao tipo de agregado ou quantidade de betume. A menor superfície específica do seixo britado conduz a uma maior quantidade de betume disponível para resistir à fadiga. Isto provoca consequentemente maior vida à fadiga das misturas com seixo britado comparativamente às de diorito. A elevada quantidade de betume que as misturas SBN apresentam, provoca um aumento significativo na vida à fadiga, podendo também ser devido a isto que estas misturas têm a vida à fadiga apresentada.

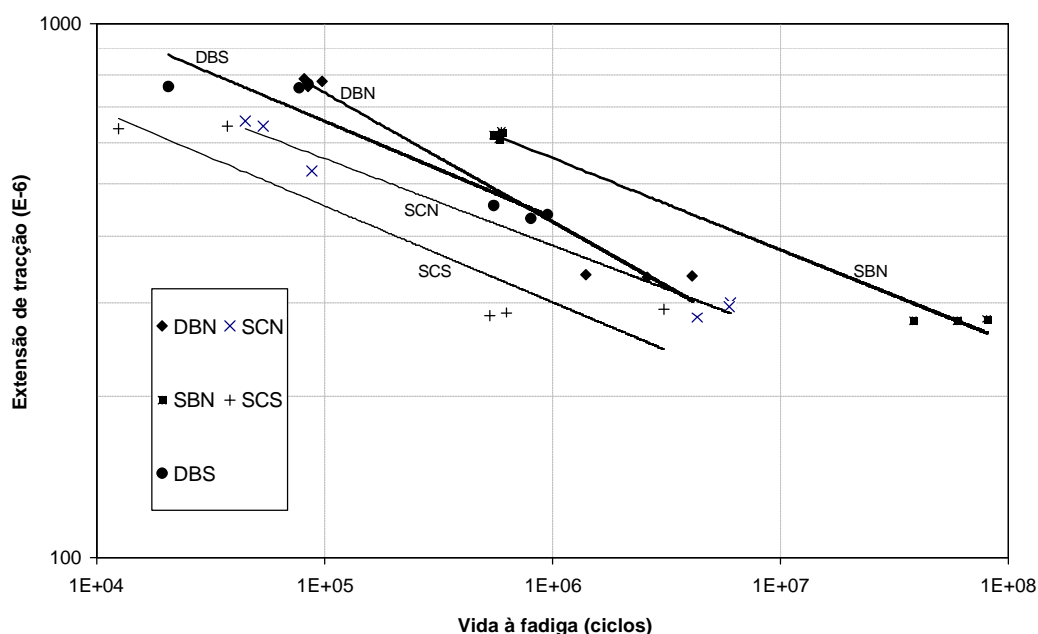


Figura 5. Leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas

O envelhecimento da mistura com diorito e betume modificado com borracha fez reduzir a vida à fadiga comparativamente à mistura sem envelhecimento, apresentando ainda maior vida à fadiga que qualquer das misturas com betume convencional.

Em relação às misturas com betume convencional, o seu comportamento foi inferior às misturas com betume modificado com borracha, apresentando a mistura envelhecida (SCS) a menor vida de todas as misturas estudadas.

O envelhecimento das misturas betuminosas provocou uma redução da sua vida à fadiga, maior no caso das misturas com betume convencional que no caso das misturas com betume modificado com borracha.

O comportamento das misturas com betume convencional foi comparado com a vida à fadiga prevista pela lei de fadiga da Shell, para o caso das misturas com betume convencional, tendo-se obtido os resultados que se apresentam na Figura 6.

É de salientar que as misturas estudadas apresentam uma vida à fadiga muito superior à prevista pelo modelo da Shell. Esta diferença poderá estar mais uma vez relacionada com o tipo de inerte, tal como já referida na comparação anterior ou ainda devido à elevada quantidade de betume que estas misturas apresentam.

A comparação do comportamento das misturas com betume modificado com borracha com o previsto pela lei da Shell (utilizando os níveis de extensão aplicados em laboratório, os módulos obtidos aos mesmos níveis de extensão e os respectivos volumes de betume) está representado na Figura 7. Desta comparação pode-se concluir que a lei de fadiga da Shell prevê com bastante rigor o comportamento das misturas betuminosas com betume modificado com borracha, apresentando-se sempre do lado da segurança.

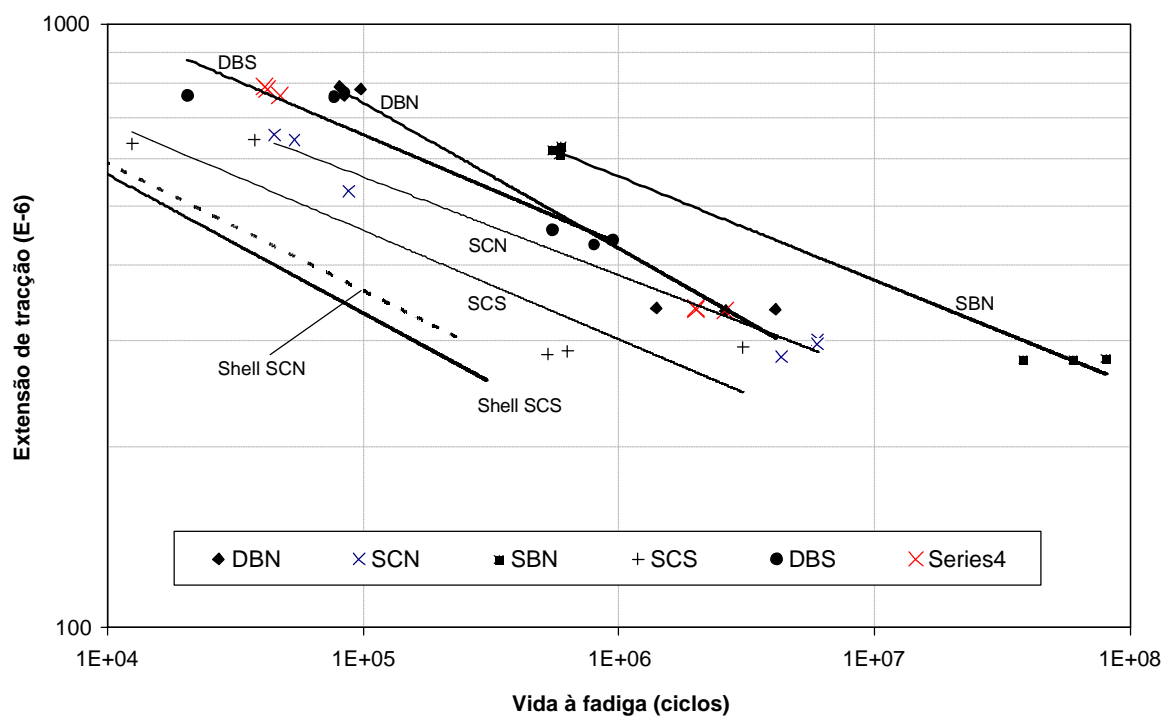


Figura 6. Comparação das leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas com a lei da Shell

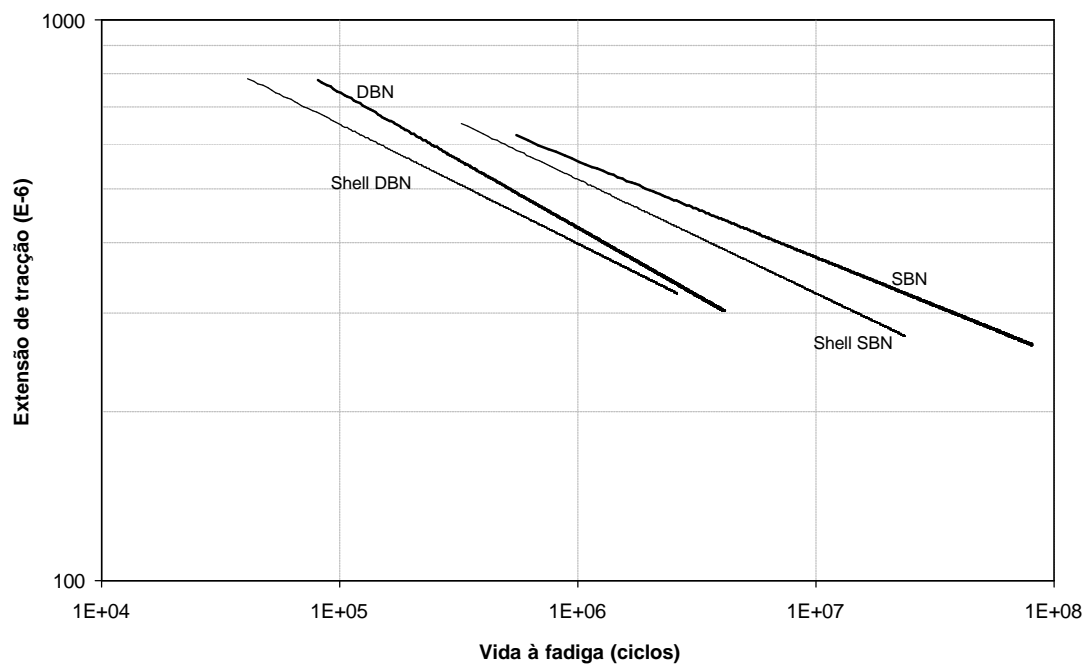


Figura 7. Comparação das leis de fadiga das misturas betuminosas com betume modificado com borracha com a lei da Shell

5. RESISTÊNCIA AOS CAVADOS DE RODEIRA

Para complementar o estudo da comparação do comportamento das misturas betuminosas, e uma vez que as misturas com seixo britado apresentaram um excelente comportamento à fadiga, foram realizados ensaio de pista para avaliar a resistência aos cavados de rodeira.

Estes ensaios foram realizados nas misturas SCN e DBN, de acordo com a norma NLT 173-94 sendo os ensaios realizados a 60 °C aplicando-se uma pressão de contacto de 700 kPa, tal como preconizado na norma BS 598-110:1998 de onde a norma NLT deriva.

Os resultados expressos em termos da deformação vertical ao longo do tempo encontram-se na Figura 8, podendo-se observar que a mistura DBN apresenta uma maior resistência aos cavados de rodeira que a misturas SCN. É de destacar neste ensaio que a mistura com seixo ao fim de 57 minutos de ensaio atingiu a ruína por excesso de deformação.

Estes resultados vêm confirmar a hipótese das misturas com seixo britado conterem mais betume que o estritamente necessário, e que foi responsável pela elevado desempenho nos ensaios de fadiga, tendo uma consequência nefasta em termos de cavados de rodeira.

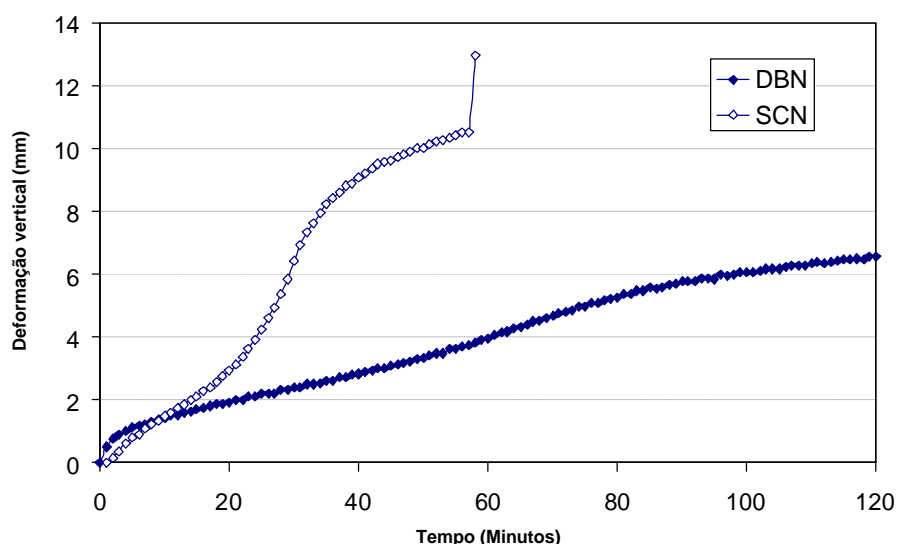


Figura 8. Resultados do ensaio de pista

6. CONCLUSÕES

O presente estudo teve por objecto a comparação do comportamento mecânico de cinco misturas betuminosas produzidas com diferentes tipos de agregado (diorito e seixo britado) e diferentes tipos de betume (convencional 35/50 e BMB - betume modificado com borracha), com simulação do envelhecimento de longo prazo da mistura betuminosa.

As porosidades dos provetes ensaiados estão de acordo com os valores especificados para os tipos de misturas ensaiadas. As percentagens de betume das misturas com seixo britado e betume convencional apresentam um valor relativamente elevado (sempre superior a 5%) enquanto que para as misturas com betume modificado com borracha, este valor está de acordo com o valor geralmente especificado para este tipo de misturas (8%).

Os módulos de deformabilidade obtidos para as misturas com betume modificado com borracha sem envelhecimento com agregado diorito e seixo britado apresentam, para a frequência de 10 Hz, respectivamente o valor de 3266 e 1929 MPa. Estes módulos correspondem aos extremos da gama normal de módulos para misturas com este tipo de ligante.

As misturas com seixo britado e betume convencional antes de envelhecimento (mistura SCN) apresentam módulos idênticos (6350 e 6435 MPa a 10Hz) podendo ser considerados valores médios para misturas com este tipo de ligante (betume convencional do tipo 35/50).

Após envelhecimento, os módulos de deformabilidade aumentaram, como era de esperar, para valores dentro dos limites aceitáveis. No caso da mistura com seixo e betume convencional (mistura SCS) ao envelhecimento provocou uma redução significativa da vida à fadiga. No caso da mistura com betume modificado com borracha o efeito do envelhecimento é praticamente imperceptível.

Em relação à vida à fadiga pode-se observar que as misturas com betume modificado com borracha apresentam mais vida à fadiga que as misturas com betume convencional. Este aumento é notório para o caso do mesmo tipo de inerte (seixo britado) onde chega a atingir dez vezes mais vida à fadiga (SBN vs SCN).

A diferença de vida à fadiga entre as misturas com betume modificado com borracha (SBN e DBN) parece ser devida ao tipo de agregado (seixo vs diorito) ou quantidade de betume. A menor superfície específica do seixo britado deve conduzir a misturas com maior quantidade de betume efectivo. Como estas duas misturas apresentavam a mesma quantidade de betume teórica, a mistura com seixo britado apresenta uma maior quantidade de betume disponível para resistir à fadiga e consequentemente maior resistência à fadiga.

É notória uma elevada vida à fadiga da mistura com seixo e betume convencional quando comparada com a lei de fadiga da Shell, podendo ser devida à elevada percentagem de betume da mistura.

Em termos de resistência aos cavados de rodeira, a mistura com seixo britado e betume convencional apresentou valores anormais chegando mesmo a atingir a ruína antes do fim do ensaio, possivelmente devido ao excesso de betume. Comparativamente, a mistura com diorito e betume modificado com borracha apresentou maior resistência aos cavados de rodeira sendo os valores obtidos normais para este tipo de mistura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Pais, J.C. – “Consideração da reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis”. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 1999.
- [2] – Pais, J.C. & Pereira, P.A.A. – “A influência da temperatura na rigidez das misturas betuminosas”. 2º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2002, Lisboa, 2002, p. 295-304.