

Caracterização da suscetibilidade ao dano por fadiga de betumes modificados com polímero envelhecidos em pavimento real

Margarida Sá da Costa, Investigadora, LNEC



1. Fendilhamento por fadiga nos pavimentos rodoviários

Patologia resultante da incapacidade dos materiais de relaxar através da libertação da tensão acumulada na aplicação repetida das cargas dos veículos

- Fenómeno iniciado nas camadas de base
- Fenómeno iniciado à **superfície** do pavimento (camada de desgaste)

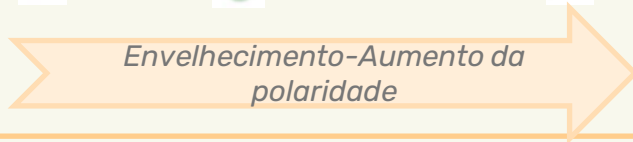


Envelhecimento dos betumes

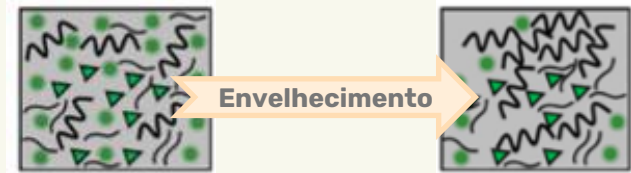
Alterações na composição química

(reações de oxidação, ciclização, clivagem de cadeias, etc.)

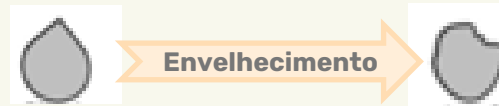
Saturados --- Aromáticos --- Resinas --- Asfaltenos



Alterações na estrutura



Alterações no comportamento reológico

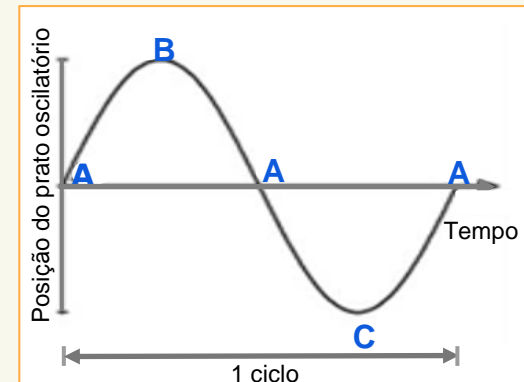
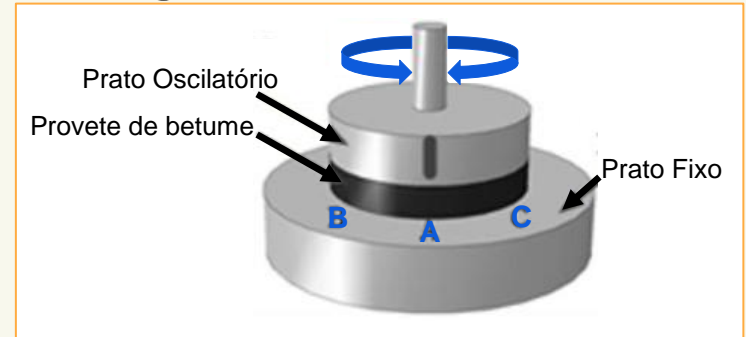


Betume mais duro e menos dúctil

2. Metodologias para a caracterização da suscetibilidade ao dano por fadiga

Reómetros rotacionais
(DSR – Reómetros de corte dinâmico)

Ensaio em regime oscilatório
(dinâmicos)



Caracterização indireta:

Ensaio reológico na região viscoelástica linear

Determinação de parâmetros reológicos - **indicadores da suscetibilidade ao dano por fadiga**, suportados, nomeadamente, por correlações com o comportamento à fadiga das misturas betuminosas

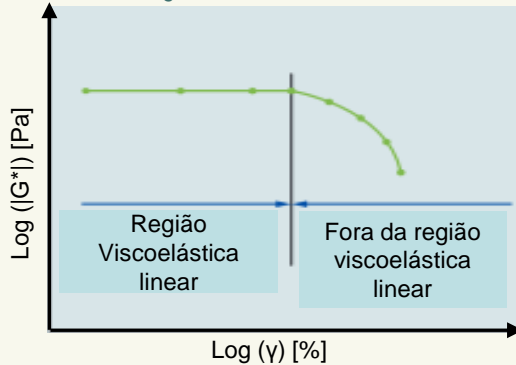
Caracterização direta:

Ensaio reológico de carregamento cíclico com indução acelerada de dano no provete

Determinação da lei da fadiga, tendo por base a mecânica do dano viscoelástico contínuo (VECD)

2.1 Indicadores da suscetibilidade ao dano por fadiga

Condições de ensaio:



- Varrimento da temperatura, fixando a frequência a 10 rad/s

Curvas isócronas

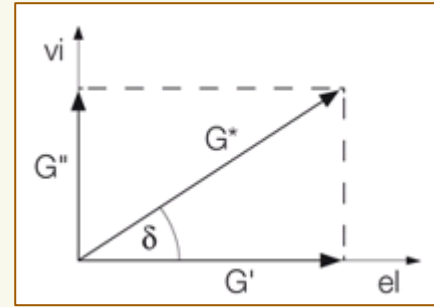
Determinação de **temperaturas críticas**

- Varrimento de frequências a várias temperaturas

Curvas isotérmicas

Determinação do **parâmetro G-R**

Funções materiais:



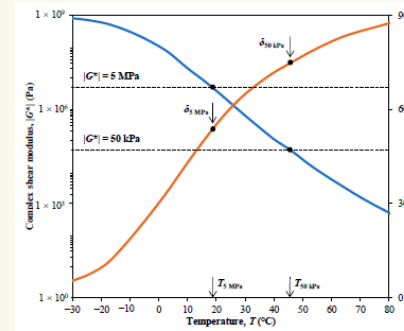
- Ângulo de fase, (δ)
- Módulo complexo, $|G^*|$
- Módulo de perdas, $G'' = |G^*| \cdot \text{sen}(\delta)$, componente dissipativa ou viscosa do $|G^*|$
- Módulo conservativo ou elástico, $G' = |G^*| \cdot \text{cos}(\delta)$, componente elástica do $|G^*|$

Temperaturas críticas

- $T @ G'' = |G^*| \cdot \sin(\delta) = 5000 \text{ kPa}$ → Módulo de perdas - Tendo por base o conceito de dissipação da energia de deformação, em que se considera que a energia dissipada é usada para gerar microfissuras, que, eventualmente, irão conduzir à fadiga → faz parte das especificações PG dos betumes - AASHTO M 320
- $T @ |G^*| = 5000 \text{ kPa}$ e correspondente δ → Associa-se a fadiga à elevada rigidez dos materiais
- $T @ \delta = 45^\circ$ e correspondente $|G^*|$
ou $T @ G' = G''$
(temperatura de transição viscoelástica: T_{cross} - *Crossover Temperature* ou VETT - *Visco-Elastic Transition Temperature*)

Temperaturas críticas

- Determinação das temperaturas críticas: interpolação a partir das isócronas a 10 rad/s
- Críticas a estes indicadores:
 - As baixas amplitudes de deformação comparativamente às deformações locais a que os betumes estão sujeitos nos pavimentos
 - Não induzem dano nos provetes
 - Nem toda a energia de deformação dissipada é consumida para o desenvolvimento de microfendas, dado que uma parte é dissipada pelo efeito viscoelástico
 - Correlações fracas com o comportamento das misturas betuminosas para certos betumes



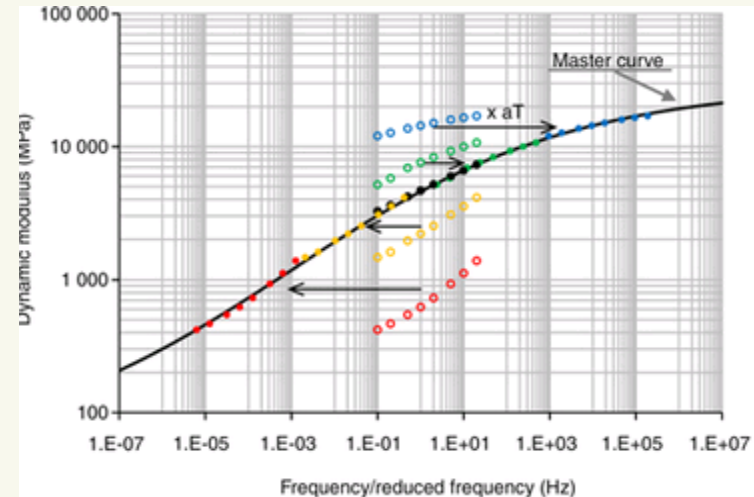
Parâmetro Glover-Rowe (G-R)

$$G - R = \frac{|G^*| \times (\cos(\delta))^2}{\text{sen}(\delta)}$$

$|G^*|$ e δ a 15°C e 0,005 rad/s

Curvas isotérmicas obtidas experimentalmente a várias frequências de deformação são deslocadas para construir a curva mestra a 15°C

Interpolação da curva mestra para determinar $|G^*|$ e δ a 15°C e 0,005 rad/s



Parâmetro Glover-Rowe (G-R)

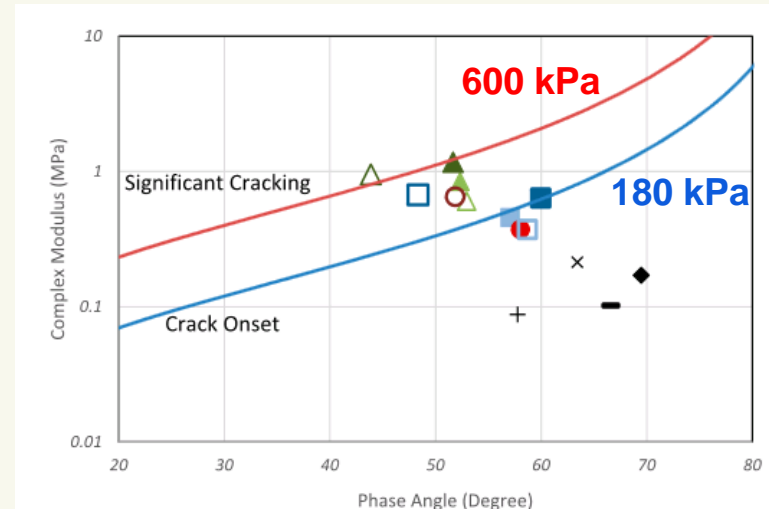
$$G - R = \frac{|G^*| \times (\cos(\delta))^2}{\text{sen}(\delta)}$$

$|G^*|$ e δ a 15°C e 0,005 rad/s

Correlação com a ductilidade dos betumes

Considera que o fenómeno de fadiga, para além de estar associado à rigidez dos materiais, está também condicionado à sua capacidade dúctil

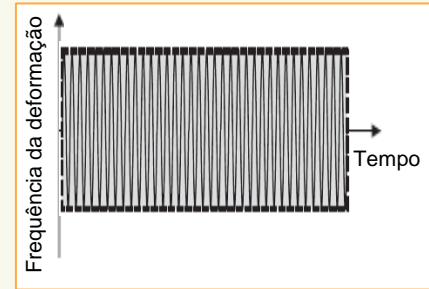
Estão definidos limites de “aviso”: 180 KPa e 600 kPa



2.2 Ensaio de fadiga

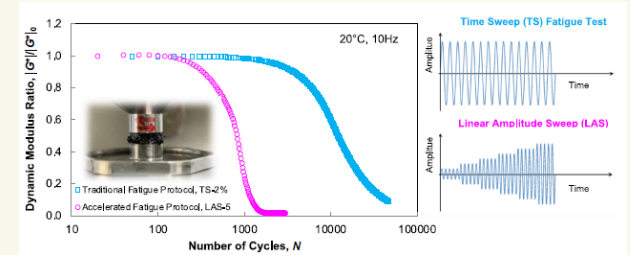
Varrimento de tempo(TS-Time Sweep)

- Ensaio em oscilação
- Temperatura constante
- Frequência de oscilação constante
- Amplitude de deformação constante
- Varrimento de tempo



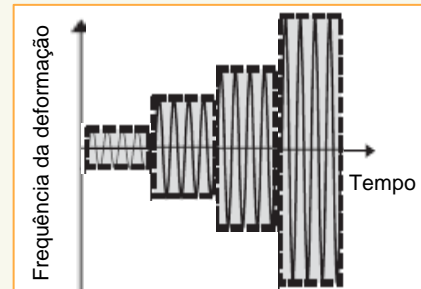
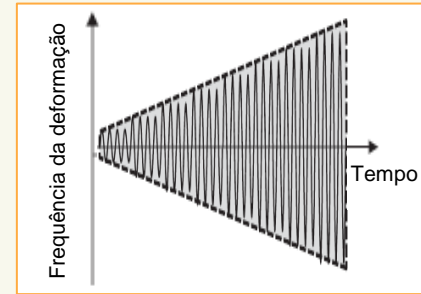
Desvantagens:

- prolongado tempo de execução, que, dependendo do material e das condições de ensaio seleccionadas, pode chegar a várias horas
- Repetibilidade dos resultados
- Possibilidade de haver artefactos, causados pelas deteriorações periféricas (nos bordos) do provete e descolamento do provete dos pratos do reómetro
- Dificuldades em manter constante a deformação, ou a tensão, em todo o diâmetro do provete



Varrimento linear da amplitude da deformação (LAS – Linear Amplitude Sweep)

- Ensaio em oscilação
- Temperatura constante
- Frequência de oscilação constante
- Varrimento da amplitude de deformação



3. Estudo experimental

3.1 Betumes envelhecidos em pavimento real

Betumes modificados com SBS do tipo PMB 45/80-65 provenientes:

- Camada de desgaste em betão betuminoso drenante do tipo PA12,5 (BBd) com 11 anos de serviço
- Seis zonas do trecho experimental definido no sub-lanço A1/A15/Torres Novas da A1 – Autoestrada do Norte (rede Brisa), compreendido entre o km 85+000 e o km 90+000 (S/N).

Betumes designados por: A, B, C, D, E, F

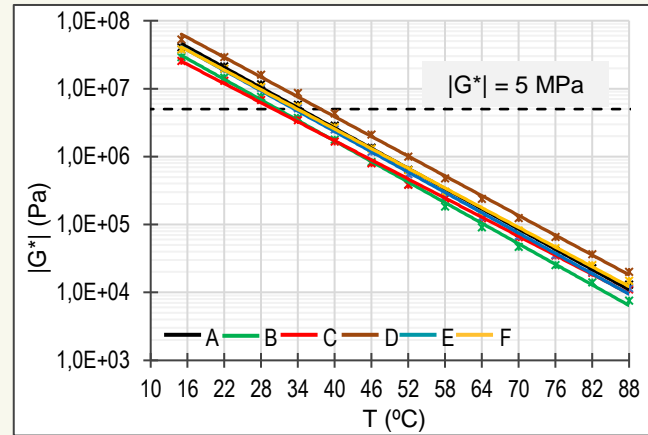
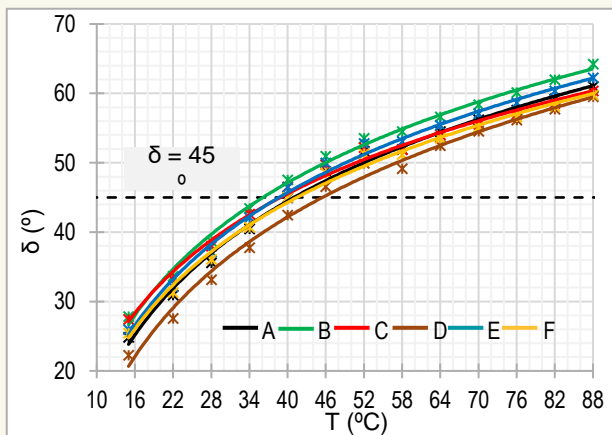
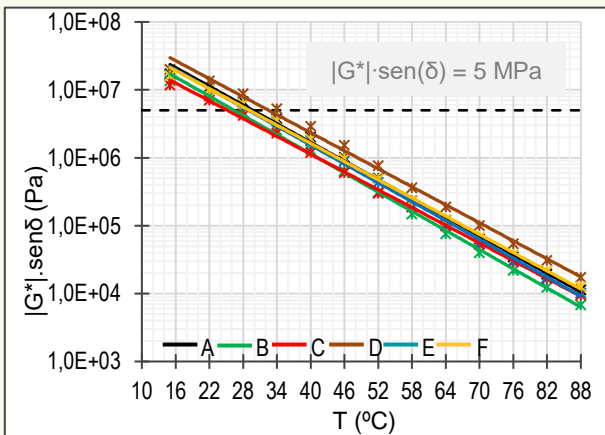
3.2 Ensaio e indicadores associados à fadiga

Condições do ensaio	Indicador da fadiga	Tratamento dos resultados e cálculo
Varrimento de temperaturas na região LVE @ 10 rad/s (a) [EN 14770]	$T_{\delta=45^\circ}$ e $ G^* _{\delta=45^\circ}$ (Transição viscoelástica)	Curvas isócronas de $ G^* $ e δ e interpolação (c)
	$T_{ G^* =5\text{MPa}}$ e $\delta_{ G^* =5\text{MPa}}$	Curvas isócronas de $ G^* $ e δ e interpolação (c)
	$T @ G^* \cdot \text{sen}(\delta) = 5\text{MPa}$	Curva isócrona de $ G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ e interpolação (c)
Varrimento de frequências na região LVE a várias temperaturas (b) [EN 14770]	Parâmetro Glover-Rowe: $G - R = \frac{ G^* \times (\cos(\delta))^2}{\text{sen}(\delta)}$	$ G^* $ e δ @ 15°C e 0,005 rad/s obtidos a partir das curvas mestras do $ G^* $ e do δ traçadas a 15°C, mediante o deslocamento das isotérmicas obtidas às outras temperaturas
Varrimento linear da amplitude de deformação (ensaio LAS) @ 30°C e 62 rad/s [AASHTO TP101-14]	Lei da fadiga	Lei da fadiga obtida com base na teoria mecânica de Dano Contínuo Viscoelástico (VECD) utilizando o procedimento descrito por Carl et al., 2019

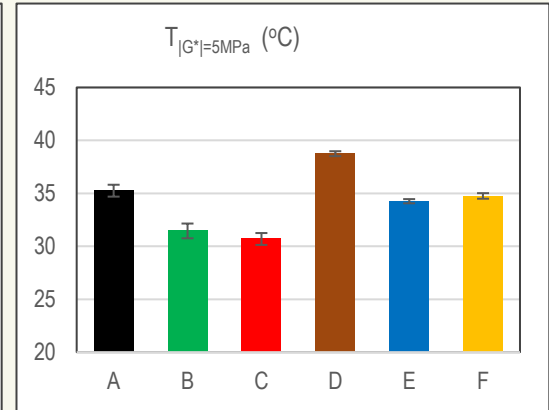
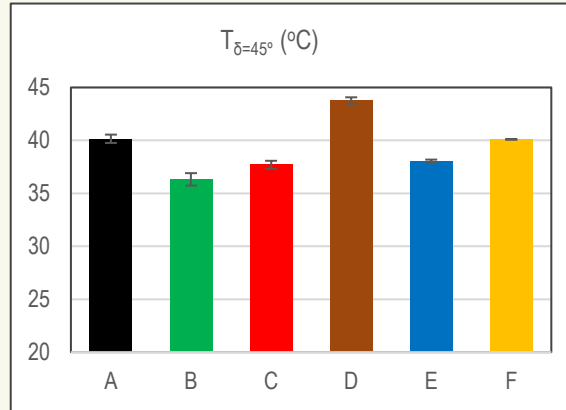
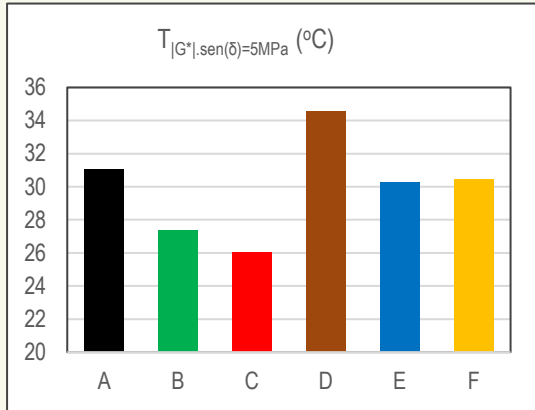
(a) Temperaturas ensaiadas: 15°C; 22°C-88°C com intervalos de 6°C; (b) Varrimento de frequências ente 0,1 rad/s e 100 rad/s às temperaturas indicadas em (a); (c) A interpolação para a determinação dos indicadores foi efetuada conforme indicado na norma EN 14770, 2023

3.3 Resultados – Indicadores associados à fadiga

Temperaturas críticas – determinadas pela interpolação das isotérmicas a 10 rad/s



Temperaturas críticas



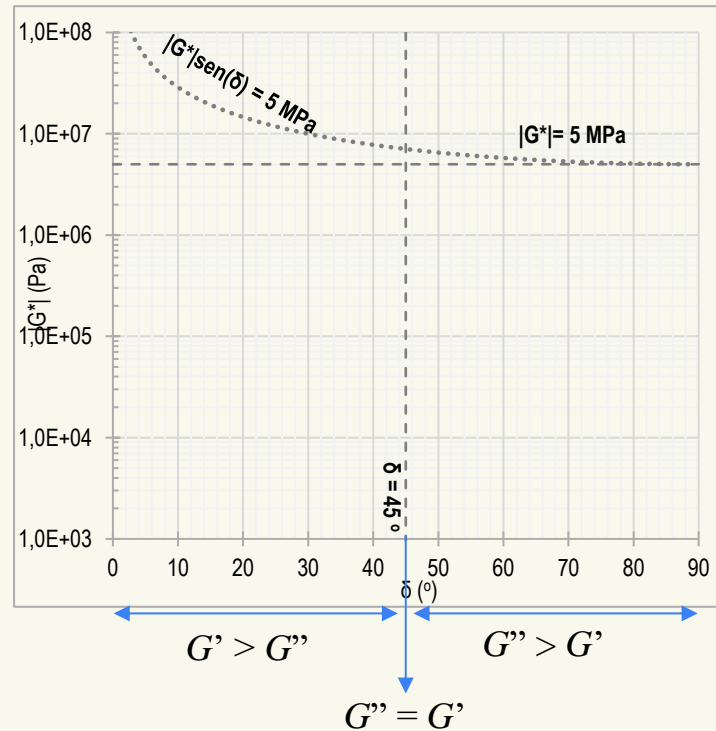
Ordenação semelhante dos betumes em termos da suscetibilidade ao dano por fadiga (melhor para o pior):

$|G^*| \cdot \text{sen}(\delta) = 5 \text{ MPa}$: C → B → E → F → A → D

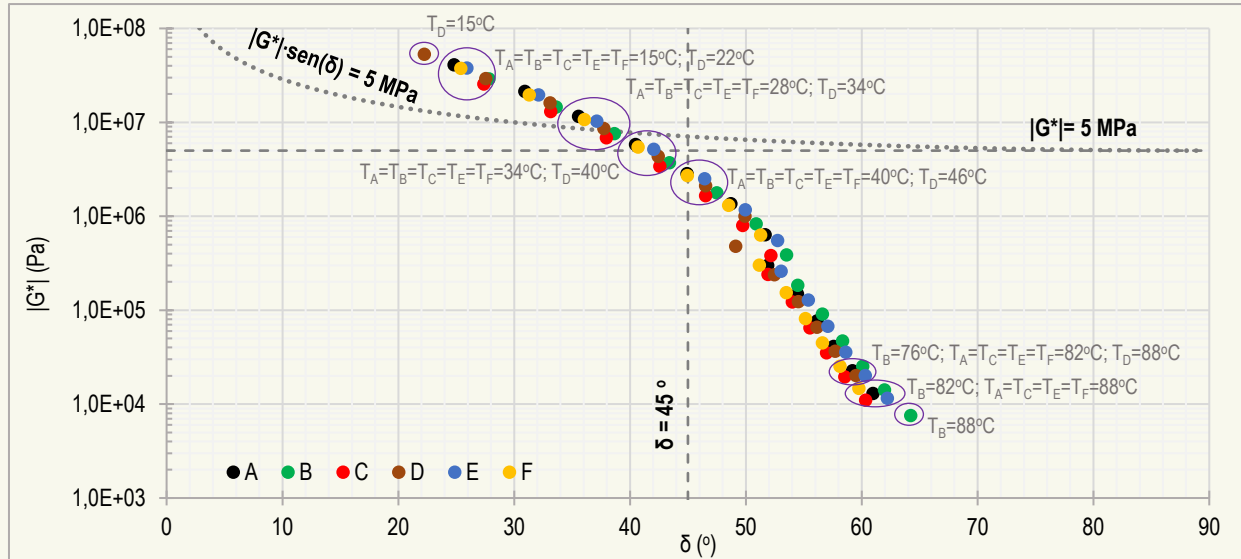
$|G^*| = 5 \text{ MPa}$: C → B → E → F → A → D

$\delta = 45^\circ$: B → C → E → F/A → D

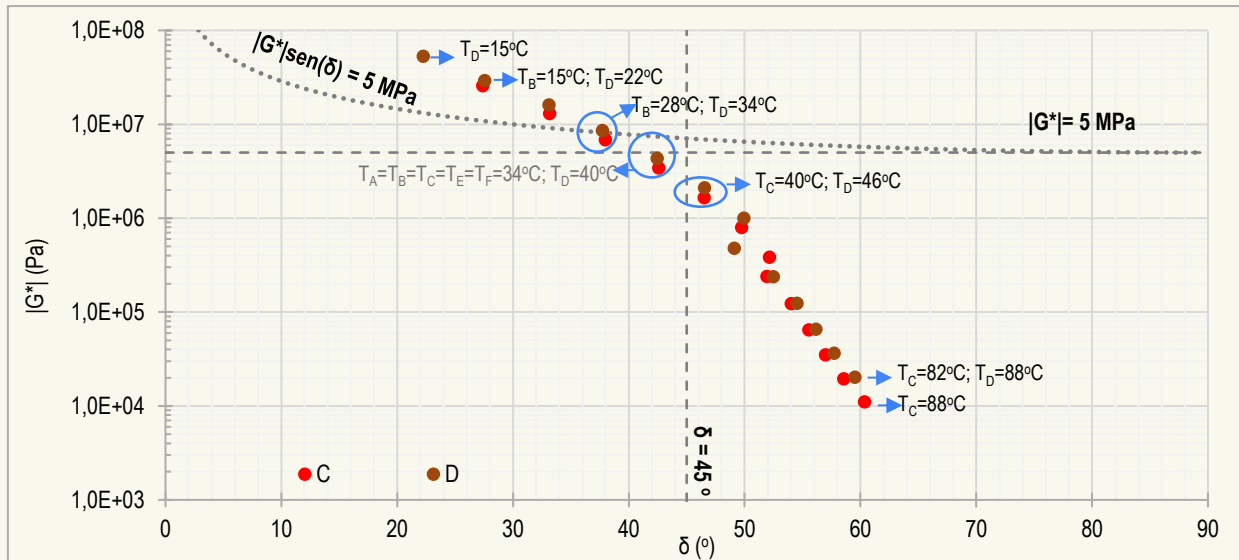
Representação das temperaturas críticas no espaço de Black



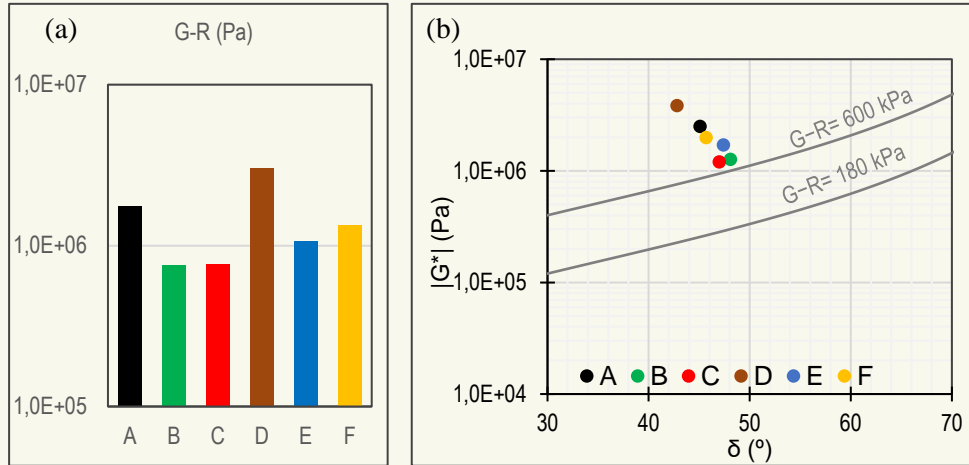
Representação das temperaturas críticas no espaço de Black



Representação das temperaturas críticas no espaço de Black



Parâmetro Glover-Rowe (G-R)



O parâmetro G-R está delimitado por dois níveis :

- (i) $G-R = 180 \text{ kPa}$, limite de aviso - indicador do início do fendilhamento
- (ii) $G-R = 600 \text{ kPa}$, limite de ruína - indicador de fendilhamento extenso.

Todos os betumes se encontram acima da linha dos 600 kPa, o que significa que estão na região associada a muito elevada suscetibilidade ao dano por fadiga (ruína)

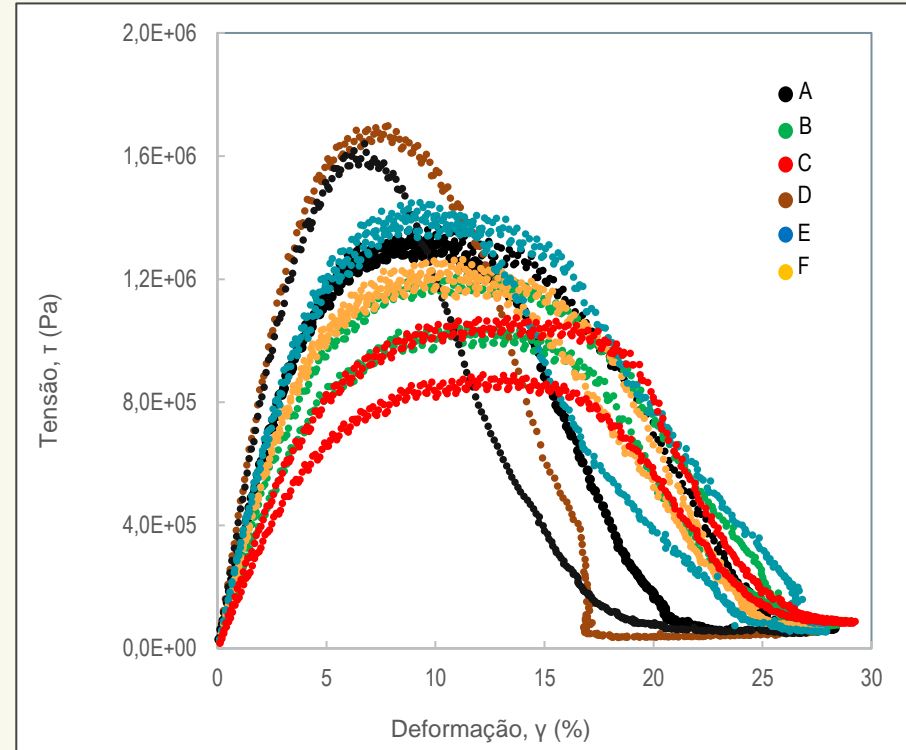
Ordenação dos betumes em termos da suscetibilidade ao dano por fadiga (melhor para o pior): B \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A \rightarrow D

3.3 Resultados – Ensaio LAS

Curvas de tensão-deformação

Betume D: mais duro e elástico

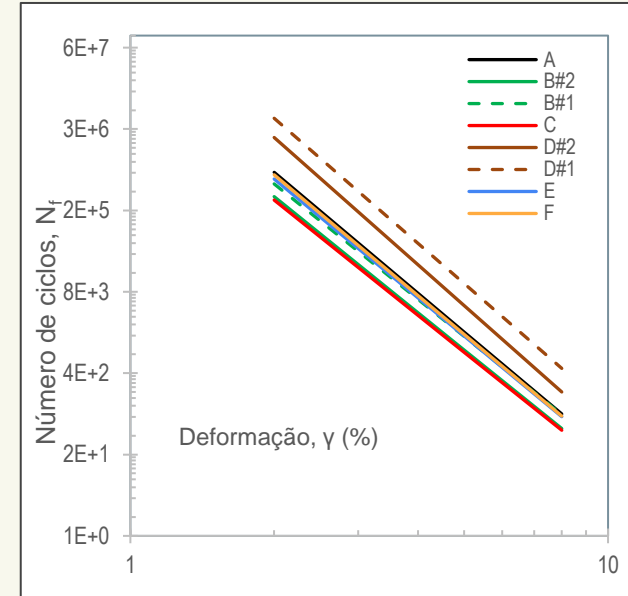
Betume C: mais mole e mais viscoso



3.3 Resultados – Ensaio LAS

Lei da fadiga

- Ordenação dos betumes (melhor para pior):
 $D \rightarrow A/E/F \rightarrow B \rightarrow C$
- Ordenação inversa em relação aos indicadores reológicos e às curvas de tensão-deformação.
- As leis de fadiga são obtidas de acordo com uma metodologia de cálculo que é sensível ao módulo da amostra e à deformação máxima, o que para estes betumes favorece os materiais mais duros, apesar de serem menos dúcteis.



4. Conclusões

- Atualmente existem diversas metodologias propostas para avaliar a suscetibilidade ao dano por fadiga dos betumes
- Experimentalmente, recorre-se a reómetros de corte dinâmico para:
 - Através de ensaios oscilatórios em regime viscoelástico linear (sem indução de dano no provete), se determinarem indicadores associados à fadiga
 - Através de ensaios oscilatórios de carregamento cíclico com indução acelerada de dano no provete, se estabelecer a lei da fadiga
- Há dificuldade em estabelecer critérios relativos à suscetibilidade ao dano por fadiga do betumes por razões de várias índoles (novos produtos, alterações climáticas...)

4. Conclusões

- O estudo experimental de 6 betumes modificados com SBS envelhecidos em pavimento real, provenientes da camada de desgaste de diferentes zonas de um trecho experimental da A1, com 11 anos de serviço, permitiu comparar a suscetibilidade ao dano por fadiga dos betumes, utilizando diferentes metodologias.
- Os indicadores reológicos obtidos em regime viscoelástico linear permitem fazer uma ordenação semelhante dos betumes em termos da suscetibilidade ao dano por fadiga
- No ensaio LAS regista-se uma resposta mecânica (tensão-deformação) por parte dos betumes em linha com a sua caracterização viscoelástica linear

4. Conclusões

- As leis da fadiga, mostram, contudo, uma suscetibilidade ao dano por fadiga dos betumes oposta à obtida com os indicadores reológicos.
- Os resultados obtidos demonstram a importância em caracterizar os ligantes betuminosos de materiais em serviço, envelhecidos através um processo natural, contrariamente a muitos estudos que analisam betumes envelhecidos em condições artificiais, e em se aprofundar o conhecimento acerca das metodologias de avaliação da suscetibilidade ao fendilhamento por fadiga e da sua capacidade de previsibilidade.

OBRIGADA!

CONTACTOS

218443232

mcosta@lnec.pt

