



Universidade do Minho

[CN-26]

Arieira, S., Maia, J., **Pais, J.C.**, Fonseca, P.

“Avaliação do comportamento reológico de betume modificado com
borracha de pneus usados”

4º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 5 – 7 de Abril de 2006

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE BETUME MODIFICADO COM BORRACHA DE PNEUS USADOS

SUSANA ARIEIRA

INVESTIGADORA DA UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES

JOÃO MAIA

PROFESSOR ASSOCIADO DA UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES

JORGE PAIS

PROFESSOR AUXILIAR DA UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES

PAULO FONSECA

DIRECTOR GERAL DA RECIPAV, CARTAXO

RESUMO

A crescente utilização de betume modificado com borracha reciclada de pneus usados (BMB) em misturas betuminosas a quente para a reabilitação de pavimentos leva a que se procure conhecer melhor as suas características e o seu comportamento de modo a potenciar a sua utilização.

Actualmente, tendo em conta a utilização corrente do BMB, a sua caracterização é realizada principalmente avaliando-se as suas propriedades, nomeadamente: i) a penetração com agulha, que avalia indirectamente a rigidez do betume; ii) a temperatura de amolecimento através do método do anel e bola, medida avaliadora da deformabilidade do betume; iii) a resiliência, que avalia a capacidade de recuperação do betume após uma deformação; iv) a viscosidade aparente com viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, que avalia a resistência ao escoamento do betume e que, no caso deste tipo de ligantes, é uma medida indirecta da quantidade de granulado de borracha adicionado ao betume.

Neste trabalho é apresentada igualmente a caracterização reológica do BMB que permite avaliar o comportamento do betume quando sujeito às acções mecânicas. Esta caracterização foi realizada através de: i) G' - Módulo de rigidez, corresponde à resposta elástica do material; ii) G'' - Módulo dissipativo, corresponde à resposta viscosa do material, em que avalia o comportamento viscoso do material; iii) $\tan \delta$ - que representa uma associação entre a parte viscosa e a parte elástica do material e iv) viscosidade.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização de betumes para pavimentação rodoviária é realizada através da determinação das suas propriedades que se relacionam como o seu comportamento mecânico. No caso dos betumes modificados com borracha, esta caracterização passa também pelo mesmo tipo de caracterização, principalmente pela avaliação da penetração, viscosidade, temperatura de amolecimento e resiliência.

A relação destas propriedades dos betumes e o respectivo comportamento mecânico pode ser conhecido através de relações intuitivas. Para a penetração com agulha, o seu aumento conduz a betumes mais duros que permitem obter misturas betuminosas com maior módulo de deformabilidade. A temperatura de amolecimento mede a deformabilidade do betume em que para elevados valores desta propriedade, o betume apresenta-se como mais resistente à deformação pela acção da temperatura. A resiliência é uma propriedade que se relaciona com a capacidade do betume recuperar as deformações que lhe são impostas, indicando de forma indirecta a capacidade da mistura betuminosa resistir às deformações permanentes. A viscosidade, indica a resistência do betume ao escoamento e constitui uma medida indirecta da quantidade de granulado de borracha que é adicionada ao betume base.

A caracterização reológica dos betumes é um método eficiente para avaliação do seu comportamento mecânico como material isolado, permitindo ainda a obtenção de inferências para o caso da sua aplicação em misturas betuminosas.

As principais propriedades mecânicas obtidas com a caracterização reológica dos betumes, com interesse para avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas incluem o: i) G' - Módulo de rigidez, corresponde à resposta elástica do material; ii) G'' - Módulo dissipativo, corresponde à resposta viscosa do material, em que avalia o comportamento viscoso do material; iii) $\tan \delta$ - que representa uma associação entre a parte viscosa e a parte elástica do material e iv) Viscosidade de corte.

Deste modo, neste trabalho é avaliado o comportamento reológico de 3 amostras BMB diferindo entre si do tempo de digestão utilizado na sua produção (30, 60 e 120 minutos). O BMB foi produzido com betume 35/50 e 20% de granulado de borracha com dimensão 0-0,6 mm, a uma temperatura de 180 °C.

As propriedades avaliadas no betume foram a penetração, temperatura de amolecimento, resiliência e viscosidade aparente. Relativamente ao comportamento reológico, neste estudo foi avaliado o módulo de rigidez, módulo dissipativo, $\tan \delta$ e viscosidade.

2. REOLOGIA

A reologia tem várias potencialidades e é um tema muito amplo, uma vez que os materiais têm respostas viscoelásticas a uma sollicitação, que envolve rearranjos moleculares, segmentais e conformacionais dependentes do tempo, temperatura, pressão e outros factores externos. Os ensaios devem ser compatíveis com a escala de tempos do fenómeno que se pretende estudar. Assim, são utilizados vários métodos e modos de ensaio e aplicados princípios que permitem conseguir informação sobre o material fora da gama experimental.

Os ensaios dão indicações sobre a processabilidade do material, tornando-se possível:

- Estabelecer inter-relações entre os factores para o processamento, as propriedades do material e as variáveis do processo, como a temperatura e a pressão;
- Definir a origem e o modo de evitar/minimizar a ocorrência de anomalias durante o processamento;
- Estimar a magnitude da dissipação viscosa de forma a evitar a degradação prematura do material;
- Apoiar a selecção do material mais adequado para uma aplicação específica;
- Fornecer informação sobre a estrutura molecular na óptica do controlo da qualidade de matéria-prima.

A viscosidade não é constante para fluidos não-Newtonianos, variando com a taxa de deformação, a temperatura, o tempo e a pressão.

2.1. Reómetro de Pratos Paralelos

O reómetro utilizado para realizar os ensaios reométricos no BMB foi um Reologica StressTech HR, numa configuração de pratos paralelos. Este tipo de reómetro foi sugerido por Mooney, para o estudo específico de polímeros fundidos, borrachas e materiais muito viscosos, devido à simplicidade do procedimento do carregamento da amostra. Nesta configuração a deformação não é homogénea, estando o material sujeito a uma deformação máxima junto à periferia e nula no centro. As principais vantagens e desvantagens deste tipo de reómetro indicam-se no Quadro 1.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens do reómetro de pratos paralelos

Vantagens	Desvantagens
Facilidade de carregamento de amostras muito viscosas	Taxas de corte máximas inferiores a 30s^{-1} para fluidos muito viscosos
Permite retardar a fractura através da variação da distância entre pratos	Deformação não homogénea Potenciais correcções inerciais para η baixas
Gama alargada de materiais	Potenciais escoamentos secundários

2.2. Medições Dinâmicas

Por medições dinâmicas, entende-se uma deformação oscilatória de natureza sinusoidal, de baixa amplitude, em condições controladas. Este tipo de análise é normalmente adequado para o estudo do comportamento viscoelástico linear dos fluidos, já que na região de pequenas deformações, as funções materiais são independentes da amplitude da deformação.

Deste modo, podem medir-se grandezas como o módulo complexo e as suas componentes, os módulos de rigidez, G' (parte elástica da resposta) e o dissipativo, G'' (energia dissipativa por ciclo – parte viscosa da resposta) e as viscosidades complexa, η^* , e dinâmica, η' .

2.3. Reologia de betumes

As propriedades reológicas dos betumes podem influenciar significativamente o desempenho das misturas betuminosas durante o processo de mistura, compactação e em serviço.

O estudo do comportamento reológico dos materiais betuminosos tem por objectivo principal encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura.

No caso específico do betume, a consideração da temperatura é importante, tendo em vista ser um material termo-sensível, ou seja, a sua consistência variar consideravelmente com a temperatura. Portanto, o comportamento elástico, viscoelástico e viscoso do betume é função da temperatura e do tempo de aplicação da carga. A temperaturas suficientemente baixas ou a altas-frequências, o betume reage como um sólido elástico, e quando a temperatura aumenta e a baixas frequências, a viscosidade torna-se mais evidente.

A temperaturas altas e/ou a longos tempos de aplicação de carga, o betume comporta-se essencialmente como um líquido Newtoniano, sendo a viscosidade independente da taxa de aplicação de carga (Figura 1).

Para se conseguir propriedades desejáveis do betume é mudada a composição química deste usando aditivos ou modificações através de reacção química. Adicionando polímeros consegue-se melhorar as propriedades reológicas.

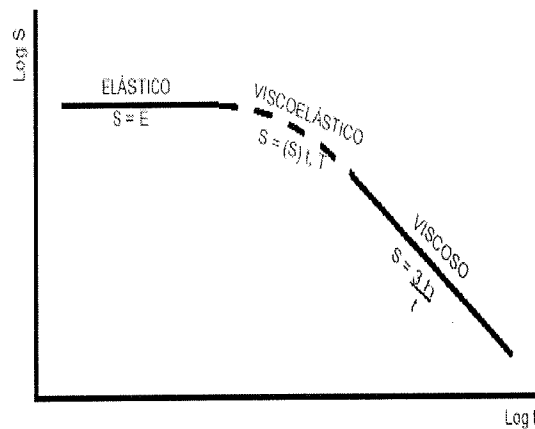


Figura 1 – Variação do módulo de rigidez com o tempo de carga e a temperatura para materiais betuminosos

As propriedades reológicas dependem da temperatura, da susceptibilidade térmica e por sua vez depende directamente da constituição química e da forma como as micelas e o meio intermicelar se organizam, até atingir o equilíbrio coloidal estável. O envelhecimento é outro factor importante, pois é dado pela oxidação das moléculas polarizáveis dos maltenos que se tornam polares e passam a fazer parte da fracção de asfaltenos. Pode concluir-se então que um pavimento ao longo da vida vai aumentando a quantidade de asfaltenos e diminuindo a quantidade de maltenos, o que leva a um endurecimento pois o equilíbrio passa constantemente do sentido das propriedades GEL, o que leva a que o betume fique com menor susceptibilidade térmica.

3. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO BETUME

De seguida são apresentados os resultados da caracterização dos betumes modificados com borracha, em que estudou a influência do tempo de digestão utilizado (30, 60 e 120 minutos), para o caso de um BMB produzido a partir de um betume base 35/50 e com a adição de 20% de granulado de borracha com dimensão 0-0,6 mm, a uma temperatura de 180 °C.

A Figura 2 apresenta-se o equipamento utilizado para a fabricação das várias amostras de BMB estudadas neste trabalho. Estes equipamentos consistem num forno, equipado com um controlador de temperatura e um conjunto motor/hélice para facilitar a mistura e as interacções entre o betume base e o granulado de borracha.

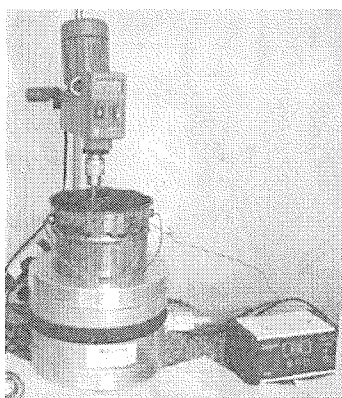
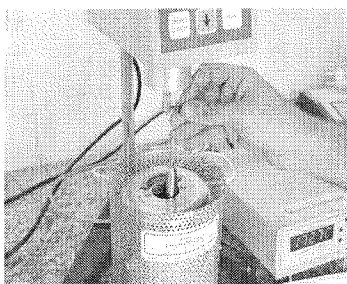


Figura 2 – Equipamento usado para a produção do BMB.

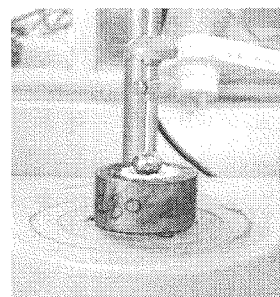
Para a caracterização dos betumes modificados com borracha foram realizados ensaios de viscosimetria rotacional com um viscosímetro Brookfield, penetração com agulha, ponto de amolecimento e resiliência.

A viscosidade rotacional é determinada através do esforço necessário para aplicar uma dada rotação a um fuso (“spindle”), com dimensões padronizadas, imerso numa amostra de ligante à temperatura de ensaio desejada segundo a norma AASHTO TP48 (Figura 3a).

O ensaio de resiliência (ASTM D5329) consiste em aplicar numa amostra de betume modificado, a uma temperatura de 25°C, um deslocamento de 10 mm, por meio de uma esfera metálica com 17 mm de diâmetro, a uma taxa de deslocamento de 1 mm/s. Após a aplicação deste deslocamento, é medida a recuperação elástica da amostra que ocorre num intervalo de tempo de 20 s (Figura 3b).



a)



b)

Figura 3 – Viscosímetro Brookfield e ensaio de resiliência

Os resultados obtidos para as propriedades do BMB são apresentados no Quadro 2 enquanto na Figura 4 é representada a influência do tempo de digestão do BMB nas suas propriedades.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios realizados no BMB

BMB		Viscosidade (cP)	Penetração (mm/10)	Ponto amolecimento (°C)	Resiliência (%)
Digestão (minutos)	Temperatura (°C)				
30	180	1800	20,6	68,0	49,0
60	180	2125	19,5	70,0	51,0
120	180	2600	18,7	83,3	48,5

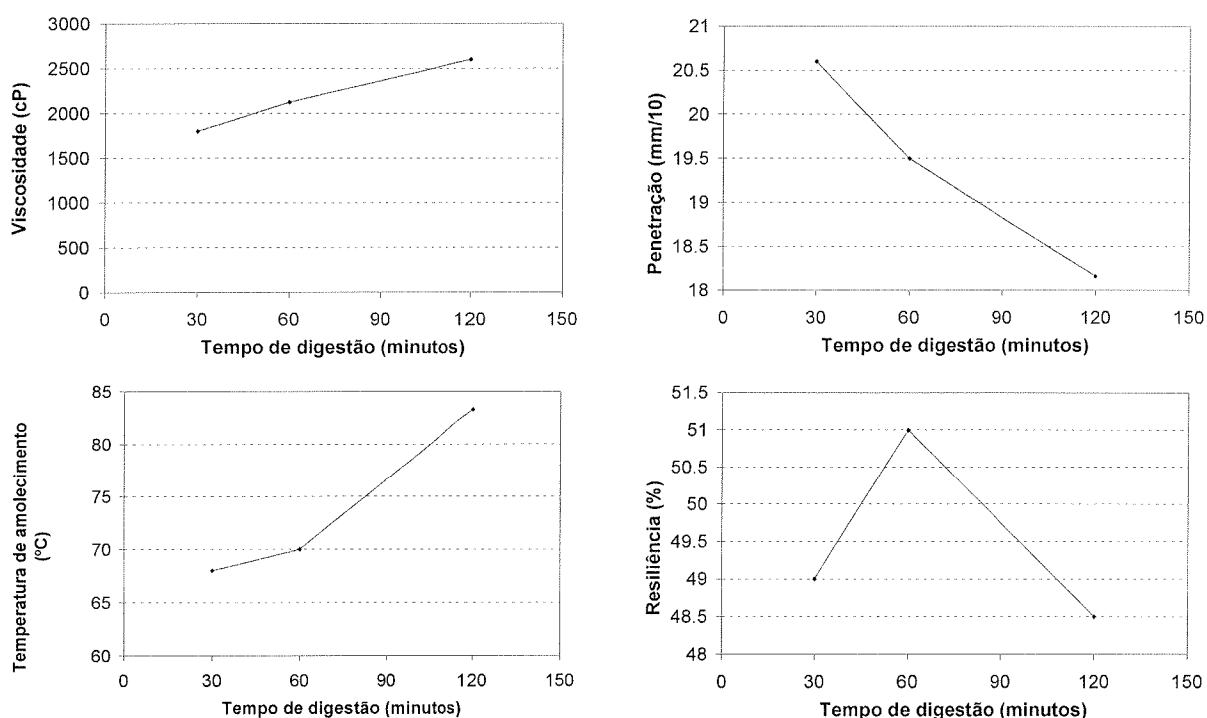


Figura 4 – Resultados das propriedades do BMB

Tendo por base os resultados obtidos, pode verificar-se que à medida que se aumenta o tempo de digestão do BMB a viscosidade aumenta. A recuperação elástica máxima foi obtida para um tempo de digestão de 60 minutos não sendo significativa a diferença para os outros tempos de digestão estudados.

O aumento do tempo de digestão da borracha no betume conduz a betumes com menor penetração (mais duros) e com maior temperatura de amolecimentos (menos sensíveis à temperatura).

4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO BETUME

Como já foi referido, para a realização dos ensaios reológicos foi utilizado um reómetro rotacional de pratos paralelos (Figura 5) Reologica StressTech HR. A amostra de BMB foi ensaiada a 180°C para uma distância entre pratos igual a 0,8 mm.

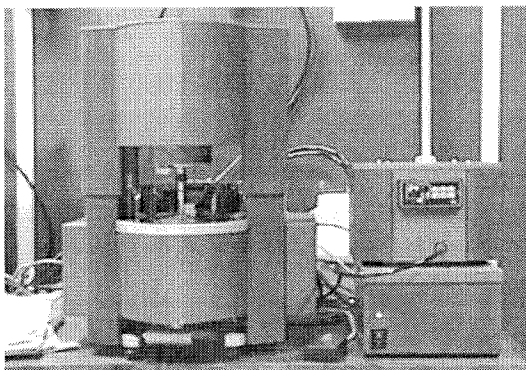


Figura 5 – Reómetro rotacional utilizado nos ensaios

Para a caracterização do comportamento reológico do BMB em regime dinâmico foram realizados ensaios de varrimentos a frequências de 0,01 Hz e 100 Hz, onde é obtido o regime linear do material, para posteriormente realização do ensaio de oscilação. Como também já foi referido, neste tipo de ensaio pode obter-se o módulo de rigidez, G' (parte elástica da resposta), o módulo dissipativo, G'' (parte viscosa da resposta) e a viscosidade complexa, η^* , em função da frequência. Em regime estacionário, foi medida a variação da viscosidade em função da temperatura, e de escoamento em corte estacionário, que permitem obter a viscosidade em função da tensão de corte.

Os resultados da caracterização reológica do BMB encontram-se representados nas Figuras 6 e 7, respectivamente para o módulo de rigidez, módulo dissipativo, tangente de delta e viscosidade.

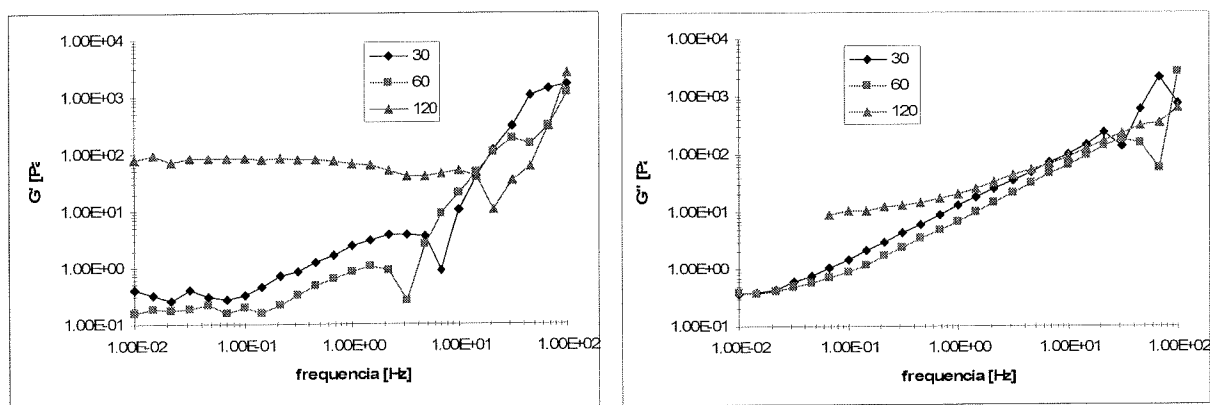


Figura 6 – Módulo de rigidez (G') e módulo dissipativo (G'') do BMB

Através do gráfico do módulo de rigidez verifica-se que é com 120 minutos de tempo de digestão que o BMB atinge maiores valores de elasticidade. Para este tempo de digestão, o BMB apresenta, para a quase totalidade da gama de frequências ensaiadas um melhor desempenho que os outros dois tempos de digestão. Para 30 e 60 minutos o desempenho do BMB é muito semelhante. Conclusão idêntica é obtida para o módulo dissipativo.

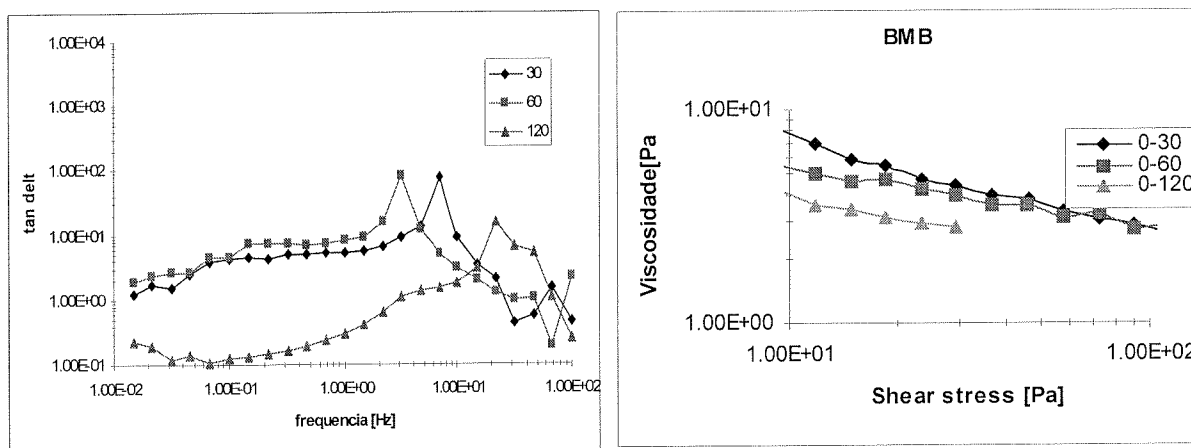


Figura 7 – Tangente de delta e viscosidade do BMB

Em relação à tangente de delta verifica-se que a 120 min de tempo de digestão o BMB atinge uma maior elasticidade que a 30 e 60 min. Pode observar-se também que com um tempo de digestão de 120 minutos a viscosidade em função da tensão de corte é menor do que para o BMB produzido com 30 e 60 minutos de digestão, não havendo grandes diferenças na viscosidade nestes dois últimos tempos de digestão.

As conclusões apresentadas para os resultados da caracterização reológica do BMB referem-se à análise em todo o domínio de frequências de ensaio testadas. No entanto, nos pavimentos, estes ligantes estão sujeitos a uma gama de frequências relativamente inferior.

Em termos de dimensionamento de pavimentos, o comportamento dos ligantes é caracterizado para frequências da ordem dos 10 Hz, pelo que no Quadro 3 é apresentada a caracterização reológica do BMB estudado para esta frequência de ensaio.

Para 10 Hz pode concluir-se que o comportamento reológico do BMB é quase independente do tempo de digestão. As diferenças que se verificavam para toda a gama de frequências ensaiadas esbatem-se quando o comportamento do BMB é analisado apenas a 10 Hz. Apenas para frequências mais baixas são verificadas as diferenças de comportamento já identificadas.

Quadro 3 – Caracterização reológica do BMB para a frequência de 10 Hz

Tempo digestão (minutos)	G' (Pa)	G'' (Pa)	tan delta
30	1.08E+01	9.98E+01	9.21E+00
60	2.07E+01	6.59E+01	3.18E+00
120	4.97E+01	9.14E+01	1.84E+00

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve por objectivo a avaliação do comportamento de betume modificado com borracha reciclada de pneus usados recorrendo às propriedades habitualmente utilizadas para esta caracterização e a ensaios reológicos.

A partir dos ensaios convencionais, pode concluir-se que para maiores tempos de digestão da borracha no betume, maior será a viscosidade e menor a penetração do betume, correspondendo a maior rigidez do material. Em termos de deformabilidade o aumento do tempo de digestão conduz a uma menor deformabilidade do betume.

Relativamente ao comportamento reológico do BMB, os ensaios realizados permitiram concluir que elevados tempos de digestão permitem obter um ligante com maior módulo de rigidez, não se verificando diferenças de comportamento com a frequência de aplicação das cargas.

Para a frequência de 10 Hz, que corresponde a uma velocidade do tráfego pesado de 50 km/h, pode concluir-se que o comportamento reológico do BMB é quase independente do tempo de digestão.

O estudo do comportamento reológico apresenta uma enorme potencialidade na caracterização dos ligantes betuminosos uma vez que permitem obter conclusões relativamente ao comportamento do ligante para uma vasta gama de frequências de aplicação de carga e tensões de corte.