

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE BETUMES MODIFICADOS CRM SUJEITOS A ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL

INÊS ANTUNES

DOCTORANDA EM INVESTIGAÇÃO DA UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA, ITÁLIA

FELICE GIULIANI

PROFESSOR ASSOCIADO DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

JORGE B. SOUSA

DIRECTOR GERAL, CONSULPAV S.A., CONSULTORES E PROJECTISTAS DE PAVIMENTOS

RESUMO

A realização de pavimentos rodoviários com elevadas prestações está vinculada a uma série de factores entre os quais a selecção dos materiais de construção assume um papel fundamental, principalmente no que respeita ao betume. Para este material, caracterizado por um complexo comportamento viscoelástico, as investigações dos últimos anos têm demonstrado que é indicado fundamentar os procedimentos de aceitação e controlo das prestações através de provas realizadas com reómetros de tipo rotacional.

Na presente comunicação discutem-se os resultados de um estudo realizado pela *Università degli Studi di Parma*, em colaboração com a empresa *Consulpav*, para a caracterização reológica de betumes base e modificados CRM utilizando um *Dynamic Shear Rheometer*.

A experiência tem demonstrado que a adição de CRM a um betume natural, através de um processo de fabricação por via húmida, altera de modo significativo a sua reologia, incrementando geralmente as propriedades elásticas, mesmo variando as condições de envelhecimento, reproduzidas à escala de laboratório, através de técnicas definidas estufa rotativa para envelhecimento de filme asfáltico e câmara de envelhecimento pressurizada.

1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO E PROGRAMA EXPERIMENTAL

As principais degradações verificadas nos pavimentos rodoviários devem-se a fenómenos, associados ao comportamento mecânico do betume no interno da mistura betuminosa, originados por solicitações repetidas e numerosas agressões de carácter ambiental. Surge assim a exigência de projectar uma super-estrutura, recorrendo a ligantes betuminosos de elevadas características mecânicas, capaz de garantir resistência e durabilidade no tempo, através de uma abordagem de tipo prestacional que considera os fenómenos que estão na origem das principais degradações (deformação permanente, fissuração térmica e fadiga).

Estradas de elevada intensidade de tráfego ou zonas de estacionamento exigem pavimentos flexíveis com uma grande capacidade de carga, grau de elasticidade e resistência às deformações viscosas. Para responder a estas exigências, usam-se misturas betuminosas

fabricadas com betumes modificados de alta consistência, com melhores prestações, avaliados pela sua intrínseca resistência às solicitações estáticas e dinâmicas (função da temperatura) e que devem ser atentamente calibrados na sua formulação e compatibilidade química.

No presente estudo foram avaliadas as características reológicas de betumes modificados com borracha reciclada de pneu de camião (*Crumb Rubber Modified - CRM*), variando o grau de envelhecimento artificial. Este tipo de betume modificado tem vindo a demonstrar, nos últimos anos, resultados extremamente positivos mas o seu uso é ainda limitado. Aprofundando o estudo dos betumes de borracha, pretende-se compreender e caracterizar o comportamento deste ligante e incentivar a difusão de um material que concilia as elevadas prestações com uma tecnologia produtiva baseada na reciclagem através de um processo tecnológico e eco-compatível.

1.2. O Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneu

A maneira mais comum de modificar um betume, para melhorar as suas características mecânicas, consiste na adição de plastómeros (ex.: *ethylene-vinyl-acetate*) ou de elastómeros (ex.: *styrene-butadiene-styrene* ou *styrene-butadiene-rubber*). Como alternativa a este tipo de modificação, têm vindo a ser utilizados betumes modificados com borracha uma vez que permitem criar misturas bastante flexíveis, com grande capacidade de absorver a reflexão de fendas, resistentes a uma grande variedade de condições estruturais e com maior durabilidade [1]. Estas misturas, permitem ainda reduzir até 6 dB o nível de ruído da camada de desgaste nas zonas urbanas [2] e apresentam a vantagem ambiental de incluírem na sua formulação uma percentagem considerável de matérias recicláveis, que não seriam de outro modo aproveitadas.

Os pneus constituem, para a maior parte do mundo, um problema ambiental. Todos os anos são produzidas cerca de 500 mil toneladas de pneus usados [3]; a sua recuperação e reutilização permite reduzir significativamente o uso de novas matérias primas e constitui um importante contributo ambiental.

De um ponto de vista físico-químico, ao adicionar a borracha de pneu reciclada ao betume de base natural esta “reage”, absorvendo e fixando a fracção malténica própria dos constituintes voláteis e aromáticos do betume. A fixação dos maltenos permite obter um aumento significativo da resistência ao envelhecimento das misturas betuminosas, uma vez que estes constituintes do betume se vão perdendo no tempo devido a fenómenos de oxidação e por acção dos raios UV [4].

Existem dois processos para o fabrico de betumes modificados com borracha, denominados “*via húmida*” e “*via seca*”. O processo utilizado em Portugal é por via húmida uma vez que o betume é modificado antes do ligante entrar na misturadora da central betuminosa. Comparado com o processo *húmido*, a *via seca* é menos popular uma vez que aumenta os custos devido a ter uma prestação inferior, ter pouca reprodutibilidade e apresentar algumas dificuldades aquando da construção do pavimento. No entanto, a *via seca* permite utilizar maiores quantidades de borracha e tem por isso vantagens ambientais.

A borracha pode ser moída através do processo “ambiental”, que é realizado mecanicamente cortando a borracha em tiras à temperatura ambiente, ou do processo “criogénico”, que

submete com nitrogénio a borracha a temperaturas muito baixas tornando-a quebradiça e fracturando-a com impactos de martelo. Antes da peneiração a borracha é sujeita a uma moagem final que pode ser de dois tipos: "*crakermill*" ou "*rotermill*".

1.3. Materiais Estudados

Foram estudados betumes modificados, com diferentes percentagens de borracha, a partir de duas bases, *soft* e *hard*.

Simularam-se as condições de um processo *húmido* de uma central betuminosa, no laboratório da *Consulpav*, para fabricar betumes CRM a partir de um betume base italiano, de classe de penetração 70/100, com diferentes percentagens de borracha: 18 %, 20 % e 22 %.

Para a fabricação de cada uma das misturas, o betume foi aquecido a uma temperatura de 180°C e seguidamente adicionou-se a borracha, num misturador com uma velocidade de 1200rpm durante 5 minutos. Seguiu-se um período de reacção de cerca 45 minutos, ao fim do qual foi retirada uma amostra para se determinarem preliminarmente as características principais (penetração, resiliência e ponto de amolecimento anel e bola). A viscosidade foi determinada de 15 em 15 minutos em analogia com as condições operativas de uma central betuminosa.

Assim fabricaram-se três betumes modificados com borracha: betume A (Base70/100 + 18%CRM), betume B (Base70/100 + 20%CRM) e betume C (Base70/100 + 22%CRM). Estes betumes foram confrontados com um betume de borracha, comercializado em Portugal, modificado (18% CRM) a partir de um base de classe de penetração 40/50, com a mesma borracha 100% vulcanizada utilizada nos betumes A, B e C.

1.4. Programa Experimental

O estudo da reologia dos betumes CRM foi efectuado através de uma avaliação dos parâmetros mecânicos dos materiais das provas de ductilidade, de solicitações de *fluência estática* e de uma quantificação da resposta a solicitações de carácter **dinâmico** (módulo complexo e ângulo de fase), que evidenciam as características visco elásticas principais. As provas experimentais foram realizadas no laboratório de betumes da *Università di Parma*, concentrando-se principalmente na análise através de um reómetro dinâmico de corte (*DSR - Dynamic Shear Rheometer*) com uma configuração de prova de pratos paralelos de 25 mm de diâmetro (AASHTO TP5).

Todas as provas foram repetidas para cada betume depois destes serem sujeitos a envelhecimento acelerado, simulado com os procedimentos de laboratório mais difundidos no panorama científico actual. Em particular foram executados envelhecimentos:

- **EREF**A – Estufa Rotativa para Envelhecimento de Filmes Asfálticos (RTFOT - *Rolling Thin Film Oven Test*), para simular o fenómeno de envelhecimento **primário** ou imediato (*short term ageing*), indicativo da acção de oxidação acelerada que o betume sofre ainda durante a fabricação e na fase de colocação em obra da mistura betuminosa;
- **CEP** - Câmara de Envelhecimento Pressurizada (PAV - *Pressure Ageing Vessel*), para simular o envelhecimento **secundário** (*long term ageing*), devido à exposição aos raios ultravioletas e a um processo de oxidação no pavimento viário após um período de exposição

de cerca 5 a 10 anos. Esta técnica, proposta pelo programa SHRP no âmbito do projecto *SUPERPAVE* [5] encontra-se ainda em fase de avaliação no caso do estudo do envelhecimento dos betumes modificados e consiste essencialmente numa forte acção de oxidação acelerada em *auto clave* (com uma pressão de 2,1 MPa) com elevada temperatura (100 °C) por um período de 20 horas.

2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

2.1. Provas Convencionais

De acordo com a norma ASTM D 6114 (*Standard Specification For Asphalt Rubber Binder*), para controlar a qualidade dos betumes de borracha, devem efectuar-se ensaios de viscosidade, penetração, resiliência e ponto de amolecimento. De acordo com norma, para climas moderados (Tipo II), como é o caso de Portugal, esta impõe os requisitos mínimos e/ou máximos, sintetizados no **Quadro 1**, que deverão ser respeitados passados 45 minutos da incorporação da borracha no betume base.

Quadro 1 – Requisitos para os Betumes Modificados CRM

Ensaio	Requisitos@45 min.	
Viscosidade, Brookfield @175°C [cP] (AASHTO TP48)	min.	1500
	máx.	5000
Penetração @25° 100g, 5s [dmm] (ASTM D5)	min.	25
Resiliência @25° [%] (ASTM D 5329)	min.	20
Ponto de Amolecimento Anel e Bola [°C] (NP – 34/1955)	min.	54.4

A mistura betume-borracha continua a “reagir” durante mais 3 horas até estabilizar completamente (**Quadro 2**). Verifica-se que o betume “C” resultante da mistura do betume base 70/100 com 22% de borracha reciclada não respeita os requisitos da norma dada a sua baixa penetração e por isso este betume não seria utilizado na prática, no entanto, para efeitos experimentais os resultados das diversas provas reológicas efectuadas serão comentados também para este ultimo caso.

Quadro 2 – Provas Convencionais para os betumes CRM

Mistura	A (70/100 + 18% CRM)						B (70/100 + 20% CRM)						C (70/100 + 22% CRM)					
% Borracha	18						20						22					
Borracha [gr]	360						400						440					
Betume [gr]	1640						1600						1560					
Tempo [min]	15	30	45	60	120	180	15	30	45	60	120	180	15	30	45	60	120	180
Viscosidade 175°C	950	1150	1550	1575	1650	1788	1400	1550	1663	1750	1888	2638	2063	2613	2850	2938	4600	4525
Penetração [dmm]	31	29	28	26	24	20	30	27	25	20	17	17	22	20	20	18	11	10
Resiliencia [dmm]	29	31	37	35	38	41	33	35	39	42	41	45	41	47	47	49	59	52
Anel e Bola [°C]	60	61	63	62	63	65	62	63	63	64	64	66	65	66	68	68	73	73

As características principais dos betumes estudados encontram-se sumariadas no **Quadro 3**.

Quadro 3 – Resultados das Provas Convencionais

Betume		Base 70/100	A (18%CRM)	B (20%CRM)	C (22%CRM)	40/50(18%CRM)
Símbolo		?	x	*	+	?
Penetração @ 25°C	m	70/100	20	17	10	40/50
Anel e bola	°C	51.7	65.0	70.4	78.0	65.6
Anel bola depois RTFOT	°C	56.0	70.1	N.D.	N.D.	74.7
Viscosidade @ 175°C	cP	N.D.	1788	2638	4525	3800

Evidencia-se um aumento considerável da consistência do betume (baixa penetração e significativo incremento do ponto de amolecimento) que reflecte em grau de modificação bastante elevado e que possibilita a utilização destes betumes em âmbitos específicos de utilização: pavimentos sujeitos a elevadas temperaturas de exercício e/ou cargas concentradas.

A evolução da viscosidade (**Figura 1**) denota uma sensibilidade, do betume e da própria reacção da borracha na fase de mistura, à percentagem de borracha adicionada. Em particular, a passagem de 20% a 22% em peso de borracha incorporada no betume base comporta um maior tempo de homogeneização e um consistente incremento no valor da viscosidade final. Os resultados evidenciam que a quantidade de borracha adicionada ao betume influencia as propriedades da mistura. Quanto maior a quantidade de borracha maior a viscosidade, a resiliência, o ponto de amolecimento e menor a penetração.

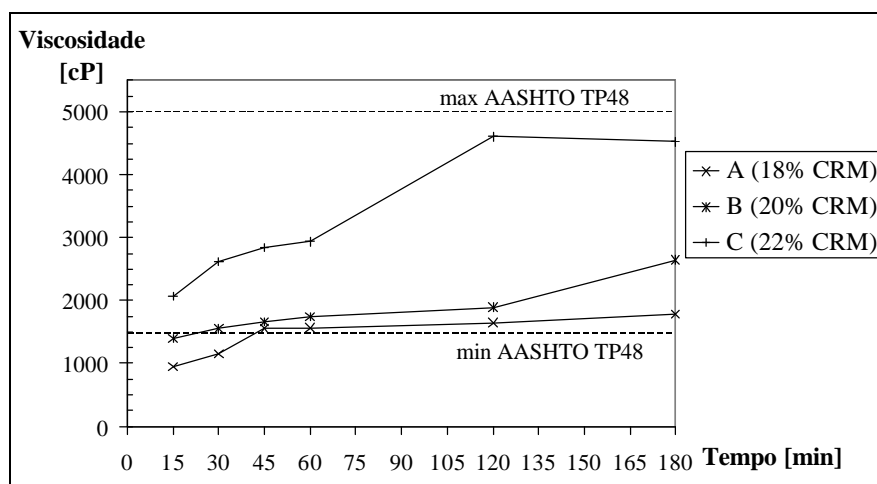


Figura 1 – Evolução da Viscosidade para os betumes CRM, a 175°C.

O aumento da consistência do betume torna-se particularmente evidente através do estudo da ductilidade e da capacidade de recuperação elástica de grandes deformações.

A prova de **ductilidade** (boletim do *Consiglio Nazionale Delle Ricerche N.44/1974*) mede o alongamento máximo, em cm, de um betume sujeito a tracção pura, com uma velocidade de alongamento de 50 mm/min e à temperatura de 25°C.

A prova de **recuperação elástica** (DIN 52013) determina a capacidade de recuperação de um betume, em %, após um alongamento de 20 cm imposto com a mesma configuração da prova de ductilidade.

Os resultados das provas de ductilidade e recuperação elástica mostram uma redução significativa da capacidade de alongamento do betume base depois de modificado com a borracha. O aumento da consistência do betume, por adição da borracha, leva a uma diminuição da ductilidade e um aumento da recuperação elástica (**Figura 2**).

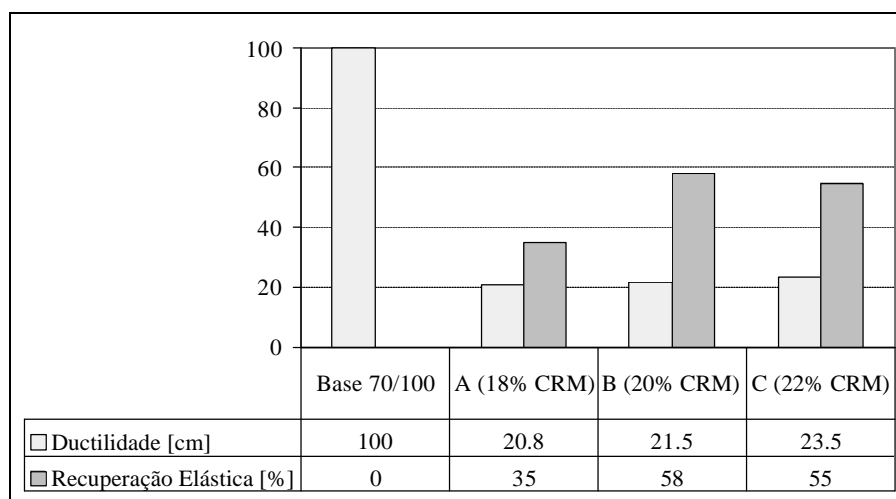


Figura 2 – Ductilidade e Recuperação Elástica dos betumes CRM

Resulta ainda interessante uma análise da evolução da ductilidade e da recuperação elástica do betume modificado CRM após envelhecimento, observando-se um aumento significativo destes dois parâmetros após RTFOT e PAV (**Figura 3**). De facto, tendo em consideração os procedimentos específicos destas duas simulações de envelhecimento, pode pensar-se que a acção de oxidação na estufa rotativa e na câmara de envelhecimento pressurizada possa, na realidade, conduzir a um melhoramento da homogeneidade entre betume base e borracha e uma maior interacção das duas fases.

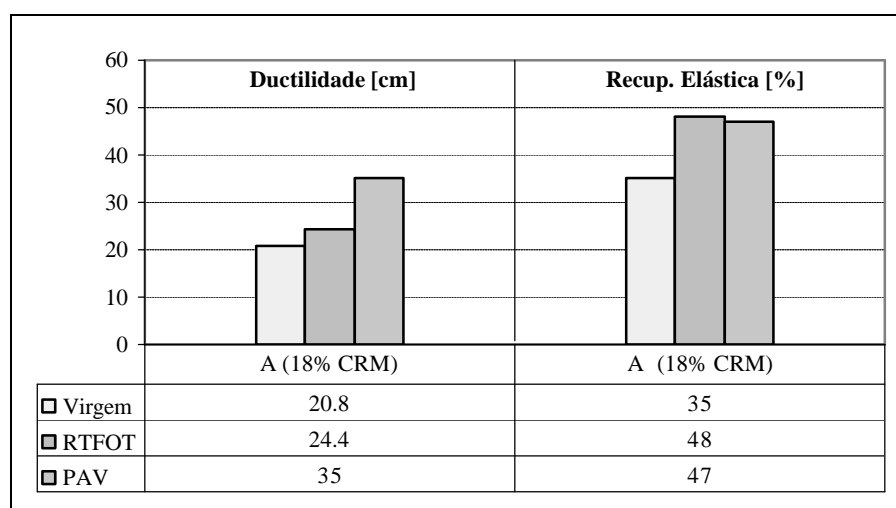


Figura 3 – Variação da Ductilidade e da Recuperação Elástica com o envelhecimento

2.2. Provas Reológicas

O DSR é o instrumento que melhor permite determinar os parâmetros viscoelásticos do betume, controlando perfeitamente a cinemática do fluxo do ligante, sujeito a condições determinadas de carga e de temperatura. A amostra de betume, na forma sólida, semi- sólida e líquida pode ser testada a todas as temperaturas, desde a fase de fabricação da mistura betuminosa até às temperaturas de exercício próprias dos pavimentos rodoviários.

Para analisar a prestação do betume sujeito a uma aplicação estática e dinâmica do esforço de corte, executaram-se provas de *creep-recovery* (*fluência e relaxamento*) e de *frequency-sweep* (*variação de frequência*), respectivamente.

As provas foram executadas medindo, em contínuo, o valor da deformação (%) originada pela aplicação, em condições estáticas, de um esforço de corte constante $\tau = 3000$ Pa para as provas realizadas a 25°C e $\tau = 1000$ Pa para as provas a 40°C. No caso das provas a 25°C, esta solicitação é aplicada durante 600 segundos, para uma temperatura de 40°C impôs-se a remoção do esforço de corte quando a deformação atingisse os 200%. O instrumento determina a recuperação da deformação registada num período de 3600 segundos.

As provas de *creep-recovery* para os betumes CRM a 25°C (**Figura 4**) permitem quantificar a sensibilidade de cada betume à deformação, permitindo identificar a componente visco elástica e a componente propriamente viscosa, e as capacidades de recuperação no tempo destas mesmas deformações. Estes resultados são coerentes com os obtidos nas provas convencionais de ductilidade e recuperação elástica (maior deformação significa maior ductilidade).

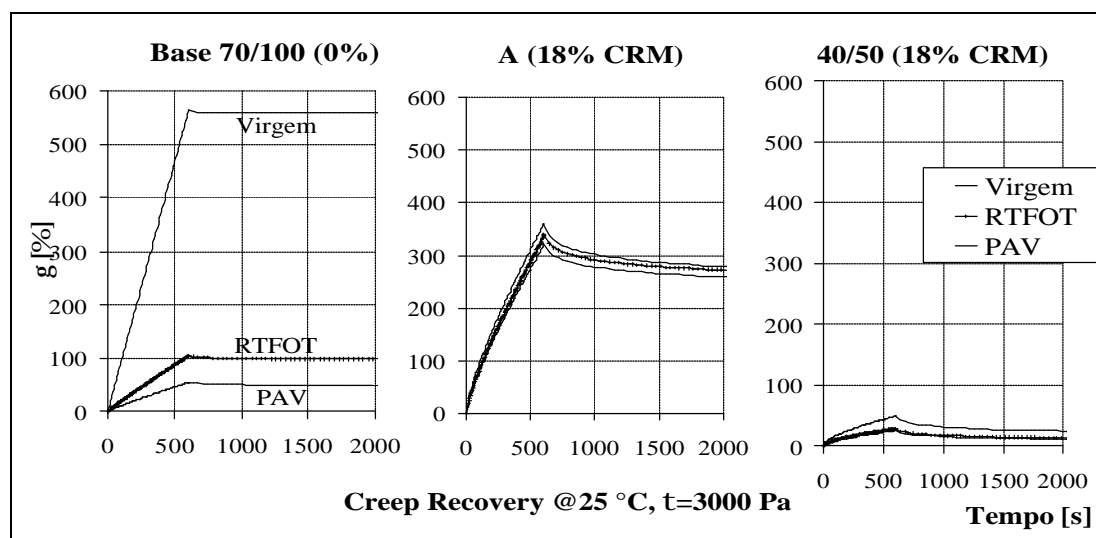


Figura 4 – Provas de Creep-Recovery@25°C para os betumes CRM

Como se pode observar, o betume base é caracterizado, já a 25°C, por um comportamento próprio de um material viscoso. A presença da borracha aumenta de forma significativa a componente elástica do betume. A prova evidencia ainda a variação das componentes elástica e plástica e dos tempos de recuperação após envelhecimento. O betume base 70/100 é fortemente sensível ao envelhecimento, passando a apresentar valores de deformação cerca de

cinco vezes mais pequenos, para o mesmo esforço de corte aplicado, logo após o envelhecimento EREFA. Os betumes modificados CRM mostram-se pouco afectados pelo envelhecimento.

A 40°C, os betumes modificados com borracha apresentam respostas muito semelhantes entre si, o que não acontecia a 25°C. A **Figura 5** evidencia a aproximação das curvas de *creep* para os betumes a (base 70/100+18% CRM) e 40/50(+18%CRM). Uma vez que o betume base do A (18% CRM) tem maior penetração, ou seja é mais *soft*, era de esperar que este fosse também mais deformável.

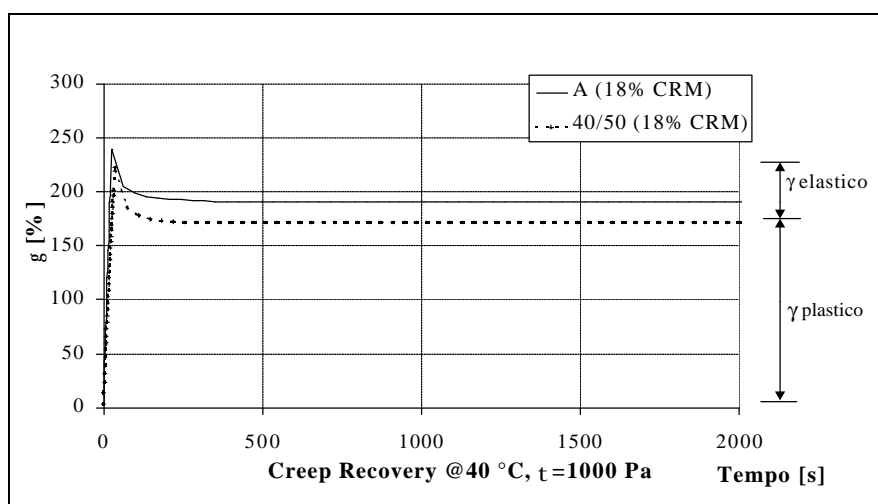


Figura 5 –Creep-recovery@40°C para os betumes 18% CRM, não envelhecidos

Através de uma aplicação dinâmica, em controlo de esforço aplicado, foram executadas provas de módulo complexo de corte (G^*) e do ângulo de fase (δ). G^* é uma medida da resistência total do material à deformação quando exposto a solicitações repetidas de corte. δ é um indicador das quantidades relativas de deformação recuperável e não recuperável. A componente elástica do módulo complexo ($G^* \cos \delta$) e a componente viscosa ($G^* \sin \delta$) estão fortemente correlacionadas com a susceptibilidade das misturas betuminosas aos fenómenos de degradação de fadiga e de deformação permanente (cavados de rodeiras) [6]. Foram executadas provas de:

- *Stress sweep* para individuar a solicitação limite “ τ ”, correspondente a 95% do valor de módulo complexo máximo (G^*_{max});
- Provas de *frequency sweep*, impondo uma solicitação “ $\tau/2$ ” para garantir que a mesma pertencesse ao campo linear, com medição do módulo complexo G^* e do ângulo de fase δ para uma frequência $\omega = 10$ rad/s.

O domínio linear e não linear do material obtém-se confrontando o módulo complexo e o esforço aplicado τ . Assim, a não linearidade é observada pela diminuição do valor do módulo complexo, identificando o ponto τ para além do qual G^* decresce abaixo de 95% do seu valor inicial (aproximadamente constante).

Da análise dos resultados, observa-se que a adição de borracha origina um incremento sistemático dos valores de módulo complexo (para uma frequência de 10 rad/s), variando a

temperatura de prova, facto ainda mais evidente na passagem da percentagem de 20 a 22% de borracha (**Figura 6**).

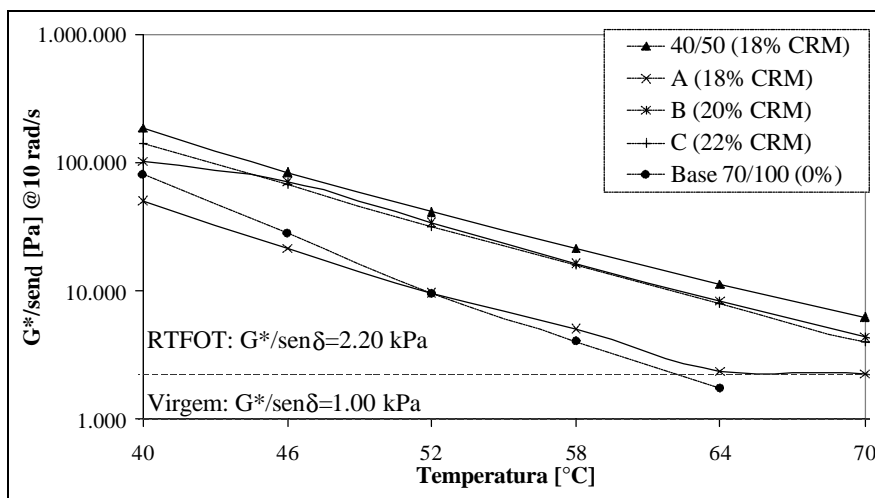


Figura 6 – Parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ para os betumes CRM.

Por outro lado, o ângulo de fase redimensiona-se para valores mais baixos que consentem menor deformação e resistência ao envelhecimento (**Figura 7**). Como já observado no caso das provas convencionais, o processo de envelhecimento a alta pressão CEP confere, relativamente ao envelhecimento EREFA, propriedades de maior ductilidade (ângulo de fase maior) ao ligante final e aumenta, em geral, o valor de G^* (**Figura 8**).

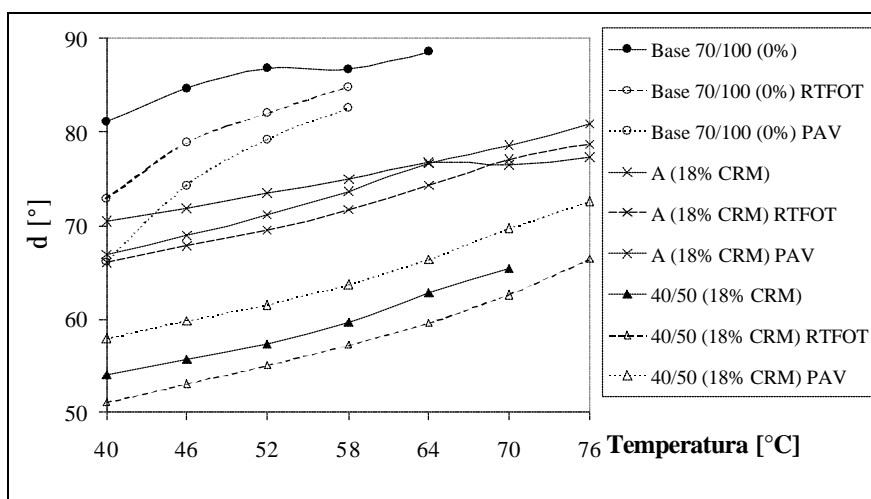


Figura 7 – Evolução do Ângulo de Fase com o envelhecimento

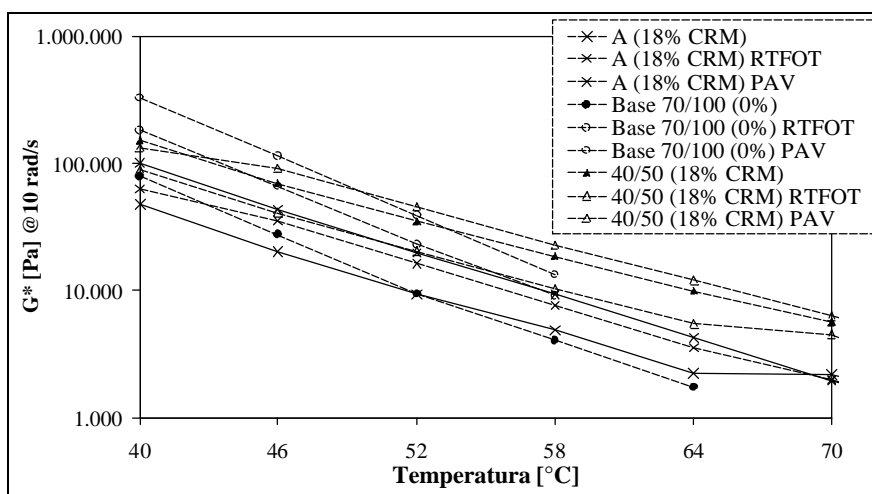


Figura 8 – Efeito do envelhecimento no Módulo Complexo

Em conformidade com a normativa SHRP é possível atribuir aos betumes estudados um grau de prestação (*performance grade PG*, AASHTO MP1), que define o seu intervalo representativo de temperatura de aplicação em obra sem que se verifiquem degradações devidas ao comportamento do ligante (deformações plásticas e rotura frágil). Assim, para cada betume calculou-se o respectivo **grau PG superior (Figura 9)**, representando no mesmo histograma o valor da temperatura limite superior para além da qual o betume pode sofrer fenómenos de deformação permanente.

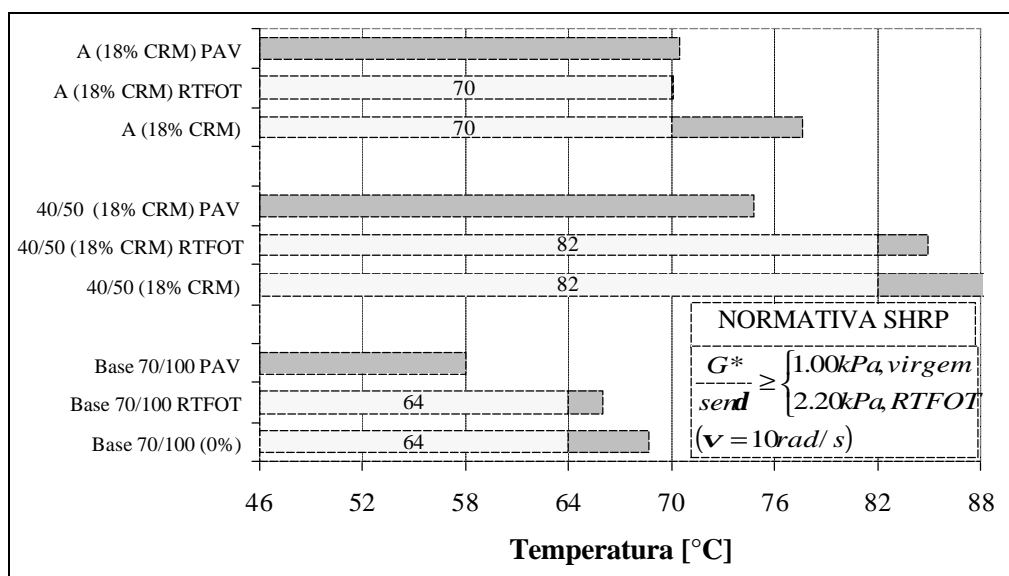


Figura 9 – Performance Grade e Temperatura Limite Superior

Como se pode verificar, a adição da borracha ao betume base 70/100 permite alargar o campo de aplicação do betume até uma temperatura de exercício “PG” de 70 °C. Utilizando uma base mais dura, a temperatura limite superior de aplicação passa a ser 82°C. A título comparativo, também foi calculada esta temperatura limite após envelhecimento CEP (não contemplado na norma SHRP para o cálculo do PG superior). Nota-se que esta temperatura

diminui relativamente ao betume original (não envelhecido), mas evidencia-se o resultado do betume a (base+18%CRM) que aumenta ligeiramente este valor relativamente à temperatura limite superior determinada após envelhecimento EREFA.

3. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam a necessidade de aprofundar o percurso teórico e tecnológico para o estudo da reologia e classificação dos betumes modificados com polímeros, à escala de laboratório, com o objectivo de evidenciar e melhor caracterizar as prestações e notáveis potencialidades de tais betumes.

A modificação de betumes com borracha, fortemente condicionada pelo seu processo de produção (temperatura, natureza do betume e da borracha, duração da mistura e reacção betume-borracha), origina uma melhoria das prestações, nomeadamente com o aumento da rigidez e da resposta elástica. Nos casos estudados, a rigidez resultou muito elevada, permitindo a aplicação destes betumes em âmbitos rodoviários e contextos ambientais especiais.

Se nos betumes tradicionais, as acções de envelhecimento acelerado originam uma acção oxidante com respectivo aumento da fracção asfáltica (e da consistência), no caso dos betumes modificados CRM, observa-se uma melhoria das características de ductilidade. Tal demonstra que o próprio envelhecimento acelerado (*thin film*, altas temperaturas e pressões elevadas) verosimilmente torna o betume mais homogéneo e melhora a interacção betume base-borracha. No entanto, não se deve esperar que este, sujeito às condições reais de envelhecimento em obra, supere, da mesma forma, os riscos de uma excessiva rigidez e expor-se a fenómenos de fragilidade, que devem ser especificamente controlados através do estudo da dosagem de borracha e a natureza do betume base.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Anderson J., Pampulim V., Saim R. e Sousa J.B. - “Asphalt Rubber laboratory properties related to type and process technology of Crumb Rubber”. Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura.
- [2] - Ballié M. e Roffé J. - “Low-noise asphalt-concrete for wearing course using CRM from used tyres”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasília.
- [3] - Burger A.F., Van De Ven M.F.C. e Jenkins K.J. - “Rheology of Betumen-Rubber - comparative study”, Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasília.
- [4] - Montepara A. e Giuliani F. - “Variation in chemical and rheological properties of betumen due to aging action”. International Conference “Chemistry and Ecology of composite materials based on betumen emulsions and modified betumen”, Minsk, Belarus 1999.
- [5] - Bahia H. e Anderson D. - “The Pressure Aging Vessel (PAV): a test to simulate rheological changes due to field ageing”, Physical properties of asphalt cement binders: ASTM STP 1241, Philadelphia, Usa, 1995.
- [6] - Montepara A., Giuliani F., Antunes I., D’Elia L. e Italia P. - “Evaluation of modified betumen out of the Linear Viscoelastic Approach”. Eurasphalt and Eurobetume Congress 2004, Viena.