

CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DO BETUME E A RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS BETUMINOSAS - PROJETO FUNDBITS

Fátima Alexandra Batista¹, Margarida Costa², Bernhard Hofko³, Joëlle De Visscher⁴ e Tine Tanghe⁴

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Transportes, Núcleo de Infraestruturas de Transportes, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

email: xana@lneec.pt <http://www.lneec.pt>

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Materiais, Núcleo de Materiais Orgânicos, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

³ Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, Wien 1040, Áustria

⁴ Belgian Road Research Centre (BRRC), Fokkersdreef 21, 1933 Sterrebeek, Bélgica

Sumário

O betume é o ligante utilizado por excelência no fabrico de misturas betuminosas para pavimentação, tendo uma influência fundamental no seu desempenho. No entanto, ainda não estão completamente compreendidas quais das suas propriedades mais influenciam o comportamento das misturas betuminosas. Neste âmbito, foi desenvolvido o projeto “FunDBitS – Functional-Durability related Bitumen Specification”, que teve como principal objetivo elaborar recomendações sobre as propriedades do betume a especificar por forma a obterem-se misturas betuminosas com desempenho adequado. Nesta comunicação apresentam-se as principais conclusões no que se refere às propriedades do betume relacionadas com o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas.

Palavras-chave: Betume, Ligantes betuminosos, Misturas betuminosas, Propriedades de desempenho, Deformação permanente.

1 INTRODUÇÃO

O betume é o ligante utilizado por excelência no fabrico de misturas betuminosas para pavimentação, tendo uma influência fundamental no seu desempenho. No entanto, relativamente aos betumes, nomeadamente os modificados com polímeros, não estão ainda completamente estabelecidas quais as propriedades de desempenho e seus requisitos que mais influenciam o comportamento das misturas betuminosas.

Neste âmbito, foi desenvolvido o projeto “*FunDBitS - Functional Durability-related Bitumen Specification*” [1], que obteve financiamento através do concurso promovido pela “*Conference of European Directors of Roads*” (CEDR) em 2013, para projetos de investigação no domínio da “Eficiência Energética. Materiais e Tecnologia”.

Este projeto teve como principal objetivo elaborar recomendações sobre as propriedades do betume a especificar por forma a obterem-se misturas betuminosas com o desejado desempenho, nomeadamente, no que concerne às seguintes características:

- resistência à deformação permanente;
- rigidez (módulo de deformabilidade);
- resistência ao fendilhamento a baixas temperaturas;
- resistência ao fendilhamento por fadiga;
- interação ligante/agregados, em particular, sensibilidade à água.

Neste contexto, o projeto teve em vista a identificação de correlações que servissem de base à elaboração de uma segunda geração de especificações europeias de betumes baseadas no desempenho.

Para o efeito, o projeto compreendeu uma pesquisa bibliográfica em atas de congresso e artigos científicos mais recentes (realizada em 2014/2015) [1], de modo a identificar possíveis correlações entre propriedades do betume e o desempenho das misturas betuminosas, para cada uma das características das misturas acima identificadas.

A presente comunicação refere-se especificamente às propriedades do betume relacionadas com o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas, sendo apresentadas as principais conclusões e recomendações resultantes do projeto FunDBitS [2, 3].

2 PROPRIEDADES DOS BETUMES E O DESEMPENHO DAS MISTURAS BETUMINOSAS QUANTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

2.1 Deformação permanente de misturas betuminosas

Uma das degradações mais comuns observadas à superfície dos pavimentos rodoviários é o aparecimento de deformações não reversíveis – e, portanto, permanentes – na zona da passagem de rodados, que se designam correntemente por cavados de rodreira.

As deformações permanentes que têm origem nas camadas betuminosas resultam de deformações visco-plásticas dos materiais betuminosos sob a ação da repetida passagem dos veículos pesados, em particular quando estes circulam a baixa velocidade e/ou em condições de temperatura ambiente elevada. Assim, a tendência para a formação de cavados de rodreira aumenta com o aumento da temperatura. Por esta razão, os ensaios para avaliação quer das propriedades do betume quer do desempenho das misturas betuminosas em termos de deformações permanentes, são efetuados a altas temperaturas.

De acordo com o exposto, no formulário elaborado para efeitos de identificação dos estudos que poderiam conter informação relevante quanto a possíveis correlações entre as propriedades dos betumes e o comportamento à deformação permanente de camadas betuminosas, foi previsto um campo relativo a “elevadas temperaturas de serviço” [1], tal como se apresenta na Figura 1.

Binder properties		Mixture properties	
Elevated service temperature properties		Elevated service temperature properties	
Complex modulus	DSR other	Stiffness	Stiffness test
Dynamic viscosity	Cone & Plate Coaxial cylinders Capillary viscosimeter other	Permanent deformation	Wheel tracking test Cyclic compression test other
Low Shear Viscosity	Oscillation method Creep method other	Intermediate and/or low service temperature properties	
Softening point	R&B	Stiffness	Stiffness test
Creep stiffness	Repeated Creep Test	Strength	Indirect tensile test Direct tensile test other
Compliance and recovery	MSCR test Elastic recovery	Low temperature cracking	Thermal stress restrained specimen test Crack propagation test other
Intermediate and/or low service temperature properties		Fatigue cracking	Fatigue test
Complex modulus	DSR other	Adhesion	Aggregate/Binder affinity Particle loss of Porous Asphalt (Cantabro) other
Penetration	Penetration	Water sensitivity	Indirect tensile test + conditioning Duriez AASHTO T 283 (Modified Lotmann) other
Low temperature stiffness	BBR Direct Tensile Test other	Scuffing test (ravelling)	Scuffing test
Cohesion	Force ductility Direct Tensile Test	Precision	
Ageing/Weathering			
short term ageing	RTFOT TFOT RFT Modified German RFT other		
long term ageing	PAV RCAT Modified German RFT Modified RTFOT other		
State binder			
Pure			
Modified			
Unaged			
Short term aged			
Long term aged			
Recovered			
Type of modification			
SBS			
EVA			
EVALOY			

Fig. 1. Aspeto do formulário para identificação dos estudos com informação relevante acerca de possíveis correlações entre as propriedades dos betumes e o desempenho de misturas betuminosas [1]

2.2 Métodos de ensaio para avaliar as propriedades dos betumes a elevadas temperaturas

Numa fase inicial do projeto FunDBitS [1], foram identificadas as seguintes propriedades dos betumes consideradas relevantes a elevadas temperaturas de serviço: viscosidade; temperatura de amolecimento; propriedades elasto-viscoplásticas; módulo complexo e ângulo de fase; grau PG (sistema de classificação “Performance Grade” do SUPERPAVE). Além disso, realizou-se uma revisão dos métodos de ensaio disponíveis para aferir as referidas propriedades betuminosas, identificando-se os seguintes:

Viscosidade

- Ensaio com viscosímetro de tubo capilar (*Capillary Viscometer test*): viscosidade cinemática [EN 12595] e viscosidade dinâmica [EN 12596];
- Ensaio com viscosímetro rotacional de cilindros coaxiais (*CCV - Coaxial Cylinder Viscosity test*): viscosidade dinâmica [EN 13302 (substituiu EN 13702-2)];
- Ensaio com o viscosímetro rotacional de cone-placa (*Cone and Plate Viscosity test*): viscosidade dinâmica [EN 13702 (substituiu EN 13702-1)];
- Ensaio (estático) de fluência, com reómetro de corte (*SSR - Shear Stress Rheometer*), para determinação da viscosidade a taxa de corte nula (ZSV) ou reduzida (LSV) (*Creep ZSV/LSV - Zero/Low Shear Viscosity Test*) [CEN/TS 15325 (ZSV)];
- Ensaio (dinâmico) em oscilação, com reómetro de corte dinâmico (*DSR - Dynamic Shear Rheometer*) (Figura 2), para determinação da viscosidade a taxa de corte nula (ZSV) ou reduzida (LSV) (*Oscillation ZSV/LSV - Zero/Low Shear Viscosity Test*) [CEN/TS 15324 (LSV)].

Temperatura de amolecimento

- Ensaio pelo método do Anel e Bola [EN 1427].

Propriedades elasto-viscoplásticas

- Ensaio (estático) de recuperação elástica (*Elastic Recovery test*) [EN 13398 (betumes modificados)];
- Ensaio de fluência e recuperação com múltiplos ciclos de tensão (constante/nula) (*MSCR - Multiple Stress Creep and Recovery test*), com reómetro de corte dinâmico (DSR) (Figura 2 esq.), para avaliação da capacidade de reversibilidade das deformações e da propensão para a formação de deformações permanentes dos betumes submetidos a ciclos repetidos de fluência - a tensão constante - e recuperação - a tensão nula [EN 16659].

Módulo complexo e ângulo de fase

- Ensaio com reómetro de corte dinâmico (DSR) (Figura 2 esq.), para determinação do módulo (de corte) complexo e do ângulo de fase dos betumes [EN 14770].

Grau PG (sistema de classificação “Performance Grade” do SUPERPAVE)

- Temperatura superior do grau PG.

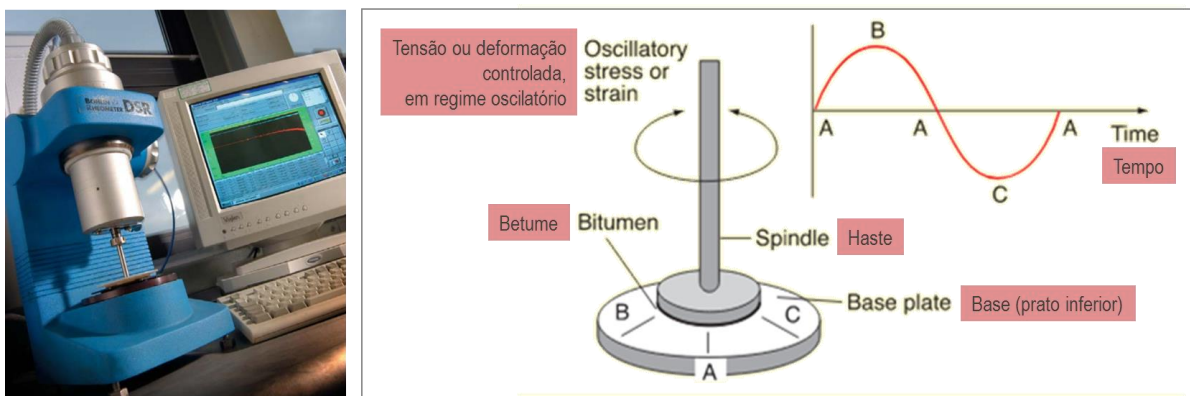


Fig. 2. Ensaio com o reómetro de corte dinâmico (DSR): exemplo de equipamento (à esquerda) e representação esquemática do seu funcionamento em regime oscilatório (à direita) [4]

2.3 Métodos de ensaio para avaliar as propriedades das misturas betuminosas a elevadas temperaturas

No que respeita especificamente à resistência à deformação permanente das misturas betuminosas, identificaram-se os seguintes ensaios:

Ensaio utilizado na Europa

- Ensaio de simulação em pista de laboratório (*WT – Wheel Tracking test*) (EN 12697-22), que estabelece métodos de ensaio para cada um dos seguintes equipamentos: “Equipamento de grandes dimensões” (*LSD – Large Size Device*) (Figura 3a); “Equipamento de dimensões extra-grandes” (*XLSD – Extra Large Size Device*); “Equipamento de pequenas dimensões” (*SSD – Small Size Device*).
- Ensaio de compressão cíclica (*CC – Cyclic Compression test*) (EN 12697-25): ensaio de compressão uniaxial e ensaio de compressão triaxial (Figura 3b).

Outros ensaios

- *SUPERPAVE shear tester, SST*;
- *Simple Performance Tests, SPT* (p.ex. *Dynamic modulus test; Flow Number; Flow Time*).

A evolução das deformações permanentes em misturas betuminosas submetidas a cargas repetidas ocorre tipicamente em três fases principais (Figura 3c): fase primária (I), que exibe um rápido aumento da deformação (com taxa decrescente), devido a uma densificação inicial do material; uma fase secundária (II), com uma taxa constante de deformação; e uma fase terciária (III), caracterizada por um aumento acentuado da taxa de deformação conduzindo à rotura do provete. Enquanto que as fases primárias e secundárias são geralmente observadas em ensaios de carga repetidas para avaliação do comportamento à deformação permanente, o mesmo já não acontece com a fase terciária, que apenas deve ser atingida num número restrito de ensaios (por exemplo, no ensaio SPT – *Flow Number, FN*) [5].

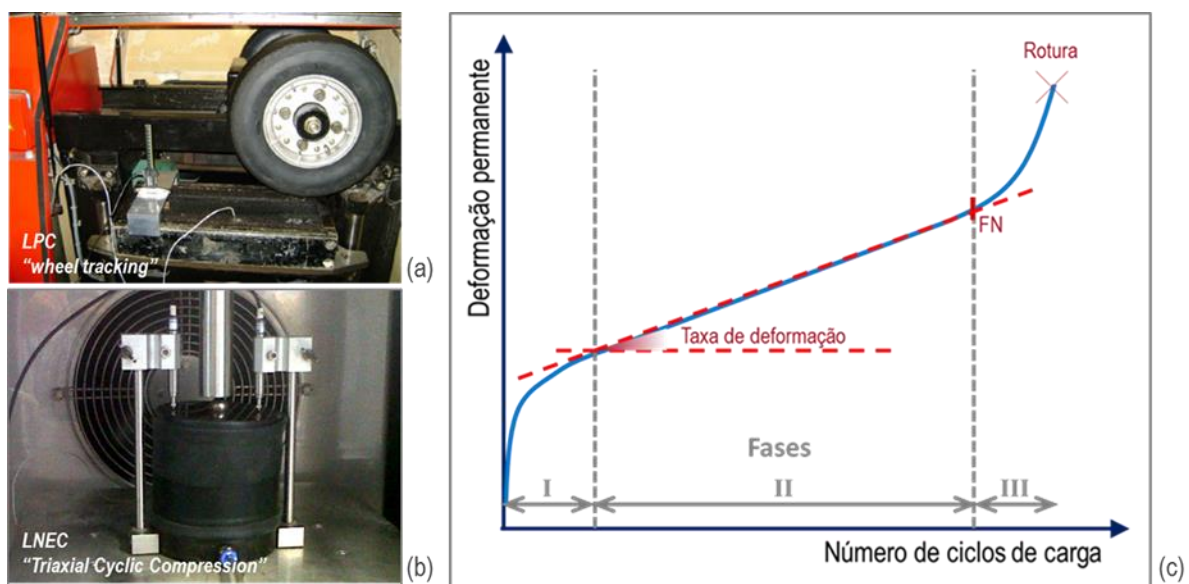


Fig. 3. (a) Ensaio de simulação em pista de laboratório [20]; (b) Ensaio de compressão cíclica triaxial; (c) Comportamento típico das misturas betuminosas à deformação permanente, em ensaios de cargas repetidas

3 AVALIAÇÃO DAS RELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DOS BETUMES E O COMPORTAMENTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DAS MISTURAS BETUMINOSAS

3.1 Viscosidade

No que concerne a possíveis correlações entre a viscosidade do betume e o desempenho das misturas em termos de deformação permanente, apenas foram identificados estudos relevantes relativos aos ensaios para determinação da viscosidade a taxa de corte nula (ZSV) ou reduzida (LSV), por fluência (estático) ou em oscilação (dinâmico), de acordo com o que se sintetiza no Quadro 1.

Nos estudos relativos aos ensaios de fluência (*creep* ZSV/LSV) apenas se obtiveram boas correlações entre a viscosidade do ligante betuminoso e o desempenho obtido em ensaios de pista (WT) quando são utilizados betumes não modificados. No entanto, já quando se relaciona a viscosidade com a deformação axial obtida em ensaios de compressão cíclica triaxial (TCC) se podem obter boas correlações, mesmo que considerando betumes modificados.

Os estudos relativos a ensaios de oscilação (*oscillation* ZSV/LSV) revelam que se podem obter boas correlações quando se relaciona: a viscosidade do ligante betuminoso com a profundidade de rodeira em ensaios de pista; ou a temperatura de equiviscosidade 1 (EVT1, temperatura à qual a viscosidade medida a uma taxa de corte muito reduzida é de 2 MPa.s) com a percentagem de profundidade de rodeira (PRD) obtida em ensaios de pista e com a taxa de fluência em ensaios de compressão cíclica triaxial (TCC).

Quadro 1. Correlações entre a viscosidade dos betumes e o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas

Artigo	Dados correlacionados	Tipo de correlação	N.º de amostras	Constante <i>a</i>	Constante <i>b</i>	R ²	Observações
Robertus <i>et al.</i> (2012) [6]	WT WTS (mm/s) vs. ZSV (kPa*s)	Potência (y= a.x ^b)	14	N/A	N/A	0.93	B / UA
			30	N/A	N/A	0.49	B & PMB / UA
Morea (2012) [7]	WT WTS (µm/min) vs. LSV (Pa*s)	y=a+b.x ⁻¹	29	1,06	2287,9	0,87	B & PMB / UA & A
				2,04	4494,5	0,86	
Gungor & Sağlik (2012) [8]	TCC Deformação axial (mm) vs. ZSV (Pa*s)	Potência (y= a.x ^b)	12	2.7886	-0,3368	0.92	B & PMB / A (TCC @40°C)
			12	4.0315	-0.3606	0.84	B & PMB / A (TCC @50°C)
Guericke & Schlame (2008) [9]	WT RD (mm) vs. ZSV (Pa*s)	Potência (y= a.x ^b)	25	N/A	N/A	0.81	B & PMB / A (WT @40°C)
			6	N/A	N/A	0.91	B & PMB / A (WT @50°C)
			11	N/A	N/A	0.91	B & PMB / A (WT @60°C)
De Visscher & Vanelstraete (2009) [10]	WT PRD (%) vs. EVT1 (°C)	Linear (y= a + b.x)	6	-0.61	42.69	0.86	B
			11	-0.6	42.12	0.83	B & PMB
	WT PRD (%) vs. EVT2 (°C)	Linear (y= a + b.x)	6	-0.61	42.71	0.85	B
			11	-0.23	22.4	0.49	B & PMB
	Taxa de fluência (µm/m/n) vs. EVT1	Linear (y= a + b.x)	6	-0.01	0.97	0.83	B
			11	-0.01	1.06	0.77	B & PMB
Taxa de fluência (µm/m/n) vs. EVT2	Linear (y= a + b.x)	6	-0.01	0.97	0.83	B	
		11	-0.01	0.71	0.76	B & PMB	

LEGENDA: B – Betume de pavimentação (não modificado); PMB – Betume modificado com polímeros; UA – Betume não envelhecido; A – Betume envelhecido; WT – Ensaio de pista; PRD – Percentagem de profundidade de rodeira em ensaios de pista (WT); TCC – Ensaio de compressão cíclica triaxial; ZSV – Viscosidade a taxa de corte nula; EVT1 – Temperatura de equiviscosidade 1; EVT2 – Temperatura de equiviscosidade 2

3.2 Temperatura de amolecimento pelo método do Anel e Bola (R&B)

A temperatura de amolecimento de um betume pelo método do Anel e Bola (R&B – *Ring & Ball*) é considerado um parâmetro tradicional para a sua avaliação a elevadas temperaturas de serviço, com uma enorme base de dados. No entanto, a comunidade científica é unânime em considerar que este método não é adequado para avaliar o desempenho de betumes modificados.

No âmbito do projeto FunDBits, foram identificados sete estudos onde se analisaram possíveis correlações entre a temperatura de amolecimento do betume e o comportamento à deformação permanente da respetiva mistura betuminosa: seis relacionando os resultados de R&B com os de ensaios de pista (WT) e um com os resultados de ensaios triaxiais (TCC), tal como se sintetiza no Quadro 2.

Pode observar-se que a maioria dos estudos em que são analisados quer betumes não modificados quer betumes modificados, as correlações obtidas são muito fracas ou mesmo inexistentes. Apesar disso, existem alguns estudos em que se obtêm correlações bastantes razoáveis mesmo considerando betumes modificados. No entanto, verifica-se que nesses casos os betumes utilizados têm todos a mesma origem, ou seja, os betumes de pavimentação são utilizados como betumes base para o fabrico dos betumes modificados.

Quadro 2: Correlações entre a temperatura de amolecimento R&B dos betumes e o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas

Artigo	Dados correlacionados	Tipo de correlação	N.º de amostras	Constante <i>a</i>	Constante <i>b</i>	<i>R</i> ²	Observações
Robertus <i>et al.</i> (2012) [6]	WT WTS (mm/s) vs. R&B (°C)	Linear (y= a + bx)	19	N/A	N/A	0.68	B + PMB
			7	N/A	N/A	0.95	B
Guericke & Schlampe (2008) [9]	WT RD (mm) vs. R&B (°C)	Linear (y= a + bx)	11	0.5893	46.523	0.84	B + PMB
Eckmann <i>et al.</i> (2012) [11]	WT RD (mm) vs. R&B (°C)	Linear (y= a + bx)	4	-0.2323	18.695	0.82	B (20/30) + PMB
			4	-0.1221	11.642	0.99	B (35/50) + PMB
Dreessen & Pascal (2009) [12]	R&B (°C) vs. RD (mm)	Logarítmica (y= a ln x + b)	13	-22.635	91.949	0.60	B + PMB
Tusar <i>et al.</i> (2009) [13]	RD (mm) vs. R&B (°C)	Logarítmica (y= a ln x + b)	7	-2.702	12.916	0.91	B + PMB
Renken (2012) [14]	RD (mm) vs. R&B (°C)	(não foi encontrada)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Reyes-Lizcano <i>et al.</i> (2009) [15]	Extensão axial (%) vs. R&B (°C)	Linear (y= a + bx)	9	-0.0188	1.9494	0.54	PMB

LEGENDA: B – Betume de pavimentação (não modificado); PMB – Betume modificado com polímeros; UA – Betume não envelhecido; A – Betume envelhecido; WT – Ensaio de pista; RD – Profundidade de rodeira em ensaios de pista (WT); WTS – Taxa de deformação em ensaios de pista (WT); R&B – Temperatura de amolecimento pelo método de Anel e Bola.

3.3 Propriedades elasto-viscoplásticas

Em relação às propriedades elásticas e de fluência dos betumes avaliadas através do ensaio (estático) de recuperação elástica (*Elastic Recovery test*) não foram identificados estudos relevantes.

Já no que concerne à avaliação daquelas propriedades através do ensaio de fluência e recuperação com múltiplos ciclos de tensão (ciclos de fluência a tensão constante e recuperação a tensão nula) – *MSCR* – foram identificados 43 artigos com dados acerca dos parâmetros obtidos no mesmo, como sejam: parâmetro de fluência, *J* (*creep compliance*), que corresponde ao quociente entre a deformação obtida no final do período de carga – a tensão constante – de um dado ciclo de fluência/recuperação e a tensão aplicada durante esse período de carga; parâmetro de fluência não-recuperável, *J_{nr}* (*non-recoverable creep compliance*), que corresponde à parcela do parâmetro de fluência relativa à deformação irreversível (permanente) no final do ciclo de fluência/recuperação; e a percentagem de recuperação, *%R* (*percent recovery*), que corresponde ao quociente entre a deformação recuperada no final de um dado ciclo de fluência/recuperação e a deformação obtida no final do período de carga desse ciclo. Verificou-se, no entanto, que apenas oito destes estudos avaliavam a relação entre os resultados dos ensaios *MSCR* e o comportamento à deformação permanente. No Quadro 3 sintetizam-se as possíveis correlações avaliadas.

Quadro 3: Correlações entre os parâmetros do ensaio MSCR em betumes e o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas

Artigo	Dados correlacionados	Tipo de correlação	N.º de amostras	Constante <i>a</i>	Constante <i>b</i>	R ²	Observações
Robertus <i>et al.</i> (2012) [6]	WT WTS vs. J_{nr} (T=45 °C & 60 °C; $\tau=1$ kPa)	log _y =a*log x	20	N/A	N/A	0,79	5B, 11PMB, 2WMB & 2 especiais / UA
						0,90	5B, 11PMB, 2WMB & 2 especiais / A (RTFOT)
Dreessen & Pascal (2009) [12], Dreessen <i>et al.</i> (2009) [17] e Dreessen & Gallet (2012) [18]	WT RD vs. J_{nr} (T=60 °C; $\tau=3,2$ kPa)	Linear (y= a + bx)	15	N/A	N/A	0,44	7 B, 6 PMB & 2 especiais / A (RTFOT)
	WT RD vs. J_{nr} (T=60 °C; $\tau=25,6$ kPa)		15	N/A	N/A	0,77	
Dueñas <i>et al.</i> (2012) [16]	WT RD vs. J_{nr} (T=60 °C; $\tau=3,2$ kPa)	Linear (y= a + bx)	4	N/A	N/A	0,87	B, PMB & RMB
	CC vs. J_{nr} (T=60 °C; $\tau=3,2$ kPa)	Linear (y= a + bx)	4	N/A	N/A	0,69	B, PMB & RMB
	CC %Recuperação vs. MSCR %R (T=60 °C; $\tau=3,2$ kPa)	Linear (y= a + bx)	4	N/A	N/A	0,96	B, PMB & RMB
D'Angelo <i>et al.</i> (2007) [19]	ALF _{FHWA} RD vs. J_{nr} (T=64 °C; $\tau=25,6$ kPa)	Linear (y= a + bx)	6	-0,112	0,493	0,81	B & PMB
	RD-Obra (após 6 anos em serviço) vs. J_{nr} (T=64 °C; $\tau=0,8$ kPa)	Linear (y= a + bx)	7	0	0,0116	0,77	B & PMB
Laukkanen <i>et al.</i> (2015) [20]	WT vs. J_{nr} ($\tau = 3200$ Pa)	Linear (y= a + bx), para WTS	9	N/A	N/A	0,98	B & PMB / UA
		Potência (y= a.x ^b), para RD	9	5,94	0,84	0,98	B & PMB / UA
Tabatabaee & Tabatabaee (2010) [21]	CC vs. J_{nr} ($\tau = 3200$ Pa)	(?)	6	N/A	N/A	0,83	B & RMB / A
		Linear (?)					U.D.C. at 40°C

LEGENDA: B – Betume de pavimentação (não modificado); PMB – Betume modificado com polímeros; RMB – Betume modificado com borracha (crumb rubber); WMB – Betume modificado com ceras (wax); UA – Betume não envelhecido; A – Betume envelhecido; WT – Ensaio de pista; ALF_{FHWA} – Ensaio acelerado (*Accelerated Loading Facility*), à escala real, da *Federal Highway Association*; RD – Profundidade de rodeira (*Rut Depth*); WTS – Taxa de deformação em ensaios de pista (*Wheel Tracking Slope*); CC – Ensaio de compressão cíclica; J_{nr} – parâmetro de fluência não-recuperável em ensaios MSCR; %R – percentagem de recuperação da deformação em ensaios MSCR; T - Temperatura de ensaio; τ – tensão de corte.

Observa-se que a maioria dos estudos reporta correlações bastante satisfatórias entre os resultados dos ensaios MSCR e o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas, quer se utilizem betumes não modificados, quer betumes modificados. De entre os parâmetros que se podem obter nos ensaios MSCR, verifica-se que aquele que está diretamente relacionado com o desempenho é a parcela não-recuperável do parâmetro de fluência, J_{nr} (*non-recoverable creep compliance*). Num estudo em que se relaciona a percentagem de recuperação da deformação (%R) com o comportamento à deformação permanente das misturas, obtém-se igualmente uma boa correlação, apesar de neste caso dever ter-se em consideração que apenas um número muito reduzido de amostras de betume foi ensaiado (apenas 4).

Da apreciação dos diversos estudos identificados parece que podem ser obtidas melhores correlações quando:

- os betumes são previamente submetidos a envelhecimento a curto prazo, p. ex. após RTFOT;
- nos ensaios de MSCR são utilizados níveis de tensão de corte elevados ($\tau \geq 3,2$ kPa).

Recomenda-se que ambos os aspetos referidos sejam alvo de investigação mais aprofundada, por forma a permitir a elaboração de especificações com este método de ensaio (MSCR).

3.4 Módulo complexo e ângulo de fase em ensaios com o Reômetro de Corte Dinâmico (DSR)

No que se refere ao módulo complexo (G^*) e ao ângulo de fase (δ) determinados em modo oscilatório sinusoidal (ensaio dinâmico) usando um Reômetro de Corte Dinâmico (*DSR* - “*Dynamic Shear Rheometer*”), foram identificados apenas seis estudos que avaliaram possíveis correlações entre as referidas propriedades reológicas do betume e o desempenho à deformação permanente (Quadro 4). Os parâmetros considerados nesses estudos foram os seguintes: módulo de corte complexo (G^*), parâmetro $G^*/\sin \delta$ e Índice de avaliação unificado, R_j (*Unified evaluation index*); que, de forma geral, foram determinados para uma frequência de 10 rad/s.

Quadro 4: Correlações entre os parâmetros do ensaio dinâmico em modo oscilatório sinusoidal em betumes e o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas

Artigo	Dados correlacionados	Tipo de correlação	N.º de amostras	Constante <i>a</i>	Constante <i>b</i>	R ²	Observações
Robertus <i>et al.</i> (2012) [6]	WT WTS vs. G^* (kPa) @ 45°C & 60°C	Potência (y= a.x ^b)	14	N/A	N/A	0,94	U / UA
			30	N/A	N/A	<0,70	B & PMB / UA
Gungor & Sağlik (2012) [8]	TCC deformação axial (mm) vs. $G^*/\sin \delta$ (kPa) @40°C & 50°C	Potência (y= a.x ^b)	12	14,22	-0,73	0,37	B & PMB / A (TCCT@40°C)
			12	4,69	-0,55	0,40	B & PMB / A (TCCT@50°C)
Guericke & Schlame (2008) [9]	WT RD (mm) vs. $T_{(G^*/\sin \delta=2,2kPa)}$ (°C) @ 60°C	Linear (y= a + bx)	11	N/A	N/A	0,77	B & PMB / A
Dressen & Pascal (2009) [12]	WT RD (%) vs. $G^*/\sin \delta$ (KPa) @ 60°C	Logarítmica (y= a ln x + b)	15	-30,55	59,29	0,27	B & PMB / A
Beckedahl <i>et al.</i> (2008) [22]	WT ^{(1),(2)} RD (mm) vs. $G^*/\sin \delta$ (kPa) @ 60°C	Potência (y=a.x ^b)	3 ⁽¹⁾	39,39	-0,29	0,93	B & PMB / UA
			3 ⁽²⁾	20,53	-0,22	0,95	B & PMB / UA
Tan <i>et al.</i> (2014) [23]	WT DS (n.ºpassagens/mm) vs. R_j ⁽³⁾ @ 60°C	Linear (y= a + bx)	7	788,07	323,02	0,99	B & PMB / UA
		GRA	5	N/A	N/A	[0,89] ⁽⁴⁾	B / UA
			2	N/A	N/A	[0,90] ⁽⁴⁾	PMB / UA
	WT DS (n.ºpassagens/mm) vs. $G^*/\sin \delta$ (KPa) @ 60°C	Linear (y= a + bx)	7	-298,59	925,37	0,99	B & PMB / UA
		GRA	5	N/A	N/A	[0,89] ⁽⁴⁾	B / UA
			2	N/A	N/A	[0,59] ⁽⁴⁾	PMB / UA

LEGENDA: B – Betume de pavimentação (não modificado); PMB – Betume modificado com polímeros; UA – Betume não envelhecido; A – Betume envelhecido; WT – Ensaio de pista; WTS – Taxa de deformação; RD – Profundidade de rodeira; DS - Estabilidade dinâmica, entendida como o número de passagens da roda por profundidade de rodeira; TCC – Ensaio de compressão cíclica triaxial; GRA – Análise Relacional “Grey”.

NOTAS:

(1) Ensaios de pista realizados sobre misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt (SMA)*.

(2) Ensaios de pista realizados sobre misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt (SMA)*.

$$(3) R_j = \frac{1}{J} = \frac{G^*}{\sin \delta (1 - \cos \delta)}$$

(4) Coeficiente obtido através da Análise Relacional “Grey” (GRA).

O módulo complexo (G^*) foi considerado apenas num estudo. Nesse caso, foi obtida uma boa correlação com a profundidade de rodeira determinada em ensaios de pista (WT) na avaliação de sete betumes não modificados, independentemente do seu estado de envelhecimento. No entanto, quando foram considerados também betumes modificados essa correlação tornou-se muito fraca.

O índice de avaliação unificado (R_j) foi também considerado num único estudo, tendo-se obtido uma boa correlação.

O parâmetro que é geralmente avaliado, é o quociente $G^*/\sin \delta$, concluindo-se na maioria dos estudos que não é adequado para avaliar a deformação permanente das misturas, uma vez que se obtêm correlações relativamente fracas quando se consideram conjuntos de betumes não modificados e modificados. No entanto, melhores correlações podem ser obtidas se os ensaios com o DSR forem conduzidos a frequências mais reduzidas.

3.5 Grau PG (sistema de classificação “Performance Grade” do SUPERPAVE)

Não foram encontrados na base de dados documentos relevantes que apresentassem uma relação clara entre o grau de desempenho do aglutinante utilizado / recuperado e o comportamento de deformação permanente da mistura betuminosa. No entanto, é do entendimento comum que a temperatura elevada de PG não é adequada para classificar o comportamento da mistura betuminosa à deformação permanente, principalmente quando se utilizam betumes modificados.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Do exposto anteriormente, pode-se concluir que os ensaios mais promissores para a obtenção de parâmetros que melhor se relacionem com o desempenho das misturas betuminosas à deformação permanente são os seguintes:

- viscosidade a taxa de corte nula/reduzida, ZSV / LSV (*Zero/Low Shear Viscosity*) pelo método de ensaio de fluência estático ou em oscilação (dinâmico) [CEN / TS 15324; CEN / TS 15325];
- parâmetro de fluência não-recuperável, J_{nr} (*non-recoverable creep compliance*), determinado no ensaio de fluência e recuperação com múltiplos ciclos de tensão (constante/nula), MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*) [EN 16659].

Comparando os dois tipos de ensaios (“*Creep or oscillation Zero/Low Shear Viscosity*” e MSCR), parece que o ensaio MSCR é mais promissor num futuro próximo, dado que:

- atualmente, parece ser um método mais fácil de implementar nos laboratórios;
- existe uma norma europeia relativa a este ensaio;
- é um ensaio preferido noutros países não Europeus, tais com EUA.

A este respeito, anota-se que está previsto que a norma relativa às especificações de betumes modificados com polímeros (EN 14023), atualmente em revisão, venha a contemplar os parâmetros J_{nr} e %R determinados nos ensaios MSCR, embora não estabelecendo requisitos. Assim, considera-se que, para que este ensaio venha efetivamente a integrar especificações de desempenho dos ligantes betuminosos, é ainda necessária alguma investigação prévia, nomeadamente no que concerne à frequência de ensaio e ao estado de envelhecimento dos betumes a serem ensaiados.

5 AGRADECIMENTOS

Esta comunicação foi elaborada no âmbito do projeto FunDBitS, que integrou o Programa de Investigação Transnacional Rodoviário do CEDR resultante da chamada de 2013 (“CEDR Transnacional Road Research Programme - Call 2013”). O referido Programa foi financiado pelas Administrações Rodoviárias da Áustria, Alemanha, Holanda, Eslovénia e Reino Unido.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. C. Nicholls *et al.*, “*Identified correlations between bitumen and asphalt properties*”, Relatório do projeto FunDBitS (Deliverable 1), CEDR Transnational Road Research Programme “Energy Efficiency – Materials and Technology” (http://silnice.fsv.cvut.cz/fundbits-data/FunDBitS%20-%20report%20D.1_fin.pdf), 2015.
2. F. Batista, M.S. Costa, B. Hofko, J. Visscher, T. Tanghe, “*Correlations between bitumen and asphalt properties – Permanent deformation (rutting)*”, Relatório do projeto FunDBitS (Deliverable 2.b), CEDR Transnational Road Research Programme “Energy Efficiency – Materials and Technology” (http://silnice.fsv.cvut.cz/fundbits-data/FunDBitS%20-%20report%20D.2_permanent%20deformation_fin.pdf), 2016.
3. F.A. Batista, B. Hofko, J. Visscher, T. Tanghe, M.S. Costa, “Towards improved correlations between bitumen properties and rutting resistance of bituminous mixtures – FunDBitS literature review”, *IOP Conf. Ser.: Mater.Sci.Eng.* **236** 012001 (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/236/1/012001>), 2017.
4. J. Read, D. Whiteoak, “*The Shell Bitumen Handbook*”, Fifth Edition, Thomas Telford Publishing, © Shell UK Oil Products Limited, 2003.
5. ARA, Inc., ERES Division, “*Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures – Appendix GG-1: Calibration of Permanent Deformation Models for Flexible Pavements*”,

National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, EUA (http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_GG.pdf), 2004.

6. C. Robertus, R. van Rooijen, L. Thimm, "A comparison of binder tests that relate to asphalt mixture deformation, *Proc. of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Istanbul)*, 2012.
7. F. Morea, "Performance of asphalt mixtures at different temperatures and load, their relation with the asphalt low shear viscosity (LSV)", *Proc. of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Istanbul)*, 2012.
8. A.G. Gungor, A. Sađlik, "Evaluation of rutting performance of neat and modified binders using zero shear viscosity", *Proc. of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Istanbul)*, 2012.
9. R. Guericke, K. Schlame, "A new 'softening-point' based on asphalt pavement performance figures", *Proc. of the 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Copenhagen)*, 2008.
10. J. De Visscher, A. Vanelstraete, "Equiviscous temperature based on low shear viscosity: Evaluation as binder indicator for rutting and critical discussion of the test procedure", *Proc. of the 7th Int. RILEM Symposium ATCBM (Rhodes)*, Loizos, Partl, Scarpas & Al-Qadi (Eds.), vol. II, pp. 1009-1018, © 2009 Taylor & Francis Group.
11. B. Eckmann, M. Mazé, S. Largeaud, S.F. Dumont, "The contribution of cross-linked polymer modified binders to asphalt performance", *Proc. of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Istanbul)*, 2012.
12. S. Dreessen, J.P. Pascal, "Seeking for a relevant binder test method for rutting prediction", *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Environmentally Friendly Roads ENVIROAD (Warsaw)*, 2009.
13. M. Tusar, M.R. Turk, W. Bankowski, L.J. Wiman, B. Kalman, "Evaluation of modified bitumen, high modulus asphalt concrete and steel mesh as materials for road upgrading", *Proc. of the 7th Int. RILEM Symposium ATCBM (Rhodes)*, 2009.
14. P. Renken, "Walzasphalte mit viskositätsabsenkenden Additiven - Entwicklung und Optimierung der Erst- und Kontrollprüfungsverfahren und Bestimmung der Einflüsse auf die performance-orientierten Asphalteigenschaften". *AiF research project No. 15589 N (Technische Universität Braunschweig)*, 2012.
15. F.A. Reyes-Lizcano, C.M. Lizarazo, A.S. Figueroa, M. Candia, G.W. Flintsch, S. Katicha, "Dynamic characterization of hot-mix asphalt mixtures using modified and conventional asphalts in Colombia", *Proc. of the 88th TRB Annual Meeting (Washington, D.C.)*, 2009.
16. A. Paez Dueñas, A. Perez Lepe, E. Moreno Martinez, V. Contreras Ibañez, "Relationships between zero shear viscosity, low shear viscosity and MSCRT tests and EN 12697-22 rutting test", *Proc. of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Istanbul)*, 2012.
17. S. Dreessen, J.P. Planche, V. Gardel, "A new performance related test method for rutting prediction: MSCRT", *Proc. of the 7th Int. RILEM Symposium ATCBM (Rhodes)*, 2009.
18. S. Dreessen, T. Gallet, "MSCRT: Performance related test method for rutting prediction of asphalt mixtures from binder rheological characteristics", *Proc. of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Istanbul)*, 2012.
19. J. D'Angelo, R. Kluttz, R.N. Dongré, K. Stephens, L. Zanzotto, "Revision of the superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test (with discussion)", *J. Assoc. Asph. Paving Technol.* **76**, 123-162 (2007).
20. O. Laukkanen, H. Soenen, T. Pellinen, S. Heynman, G. Lemoine, "Creep-recovery behavior of bituminous binders and its relation to asphalt mixture rutting", *Materials and Structures* **48**:4039-4053, 2015.
21. N. Tabatabaee, H.A. Tabatabaee, "Multiple stress creep and recovery and time sweep fatigue tests: Crumb rubber modified binder and mixture performance", *Transportation Research Record* **2180**:67-74, 2010.
22. H.J. Beckedahl, P. Sivapatham, L. Neutag, "Impacts of the compaction degree of asphalt mixes on the asphalt pavement performance", *Proc. of the 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress (Copenhagen)*, 2008.
23. Y. Tan, L. Shan, X. Li, "A unified evaluation index for high- and low- temperature performance of asphalt binder", *Proc. of the 93rd TRB Annual Meeting (Washington, D.C.)*, 2014.