

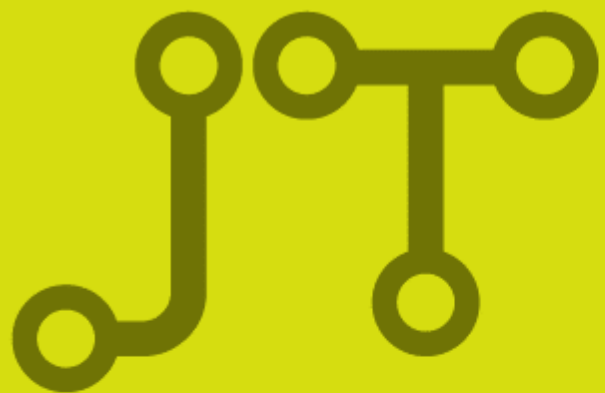
JORNADAS TÉCNICAS

Inovação em Pavimentação

Misturas Betuminosas
com Borracha Reagida e Ativada (RAR)

18 de abril de 2023 | 09h00 às 13h00 | Auditório 1 | Campus do Pragal





JORNADAS TÉCNICAS



MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE RAR
CLÁUSULAS TÉCNICAS ESPECIAIS

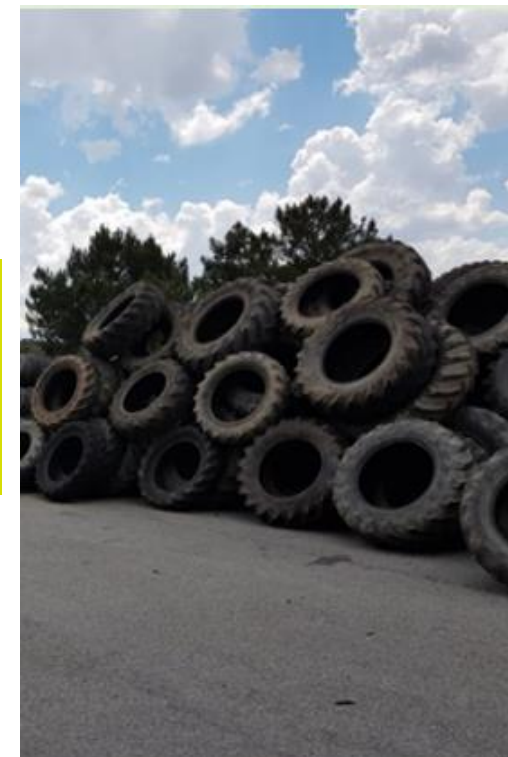
NOVEMBRO 2020

Inovação em Pavimentação

Misturas Betuminosas
com Borracha Reagida e Ativada (RAR)

**CLÁUSULAS TÉCNICAS ESPECIAIS TIPO PARA
MISTURAS BETUMINOSAS COM BORRACHA RECICLADA
DE PNEUS, REAGIDA E ATIVADA (RAR)**

Luís Quaresma



ÍNDICE

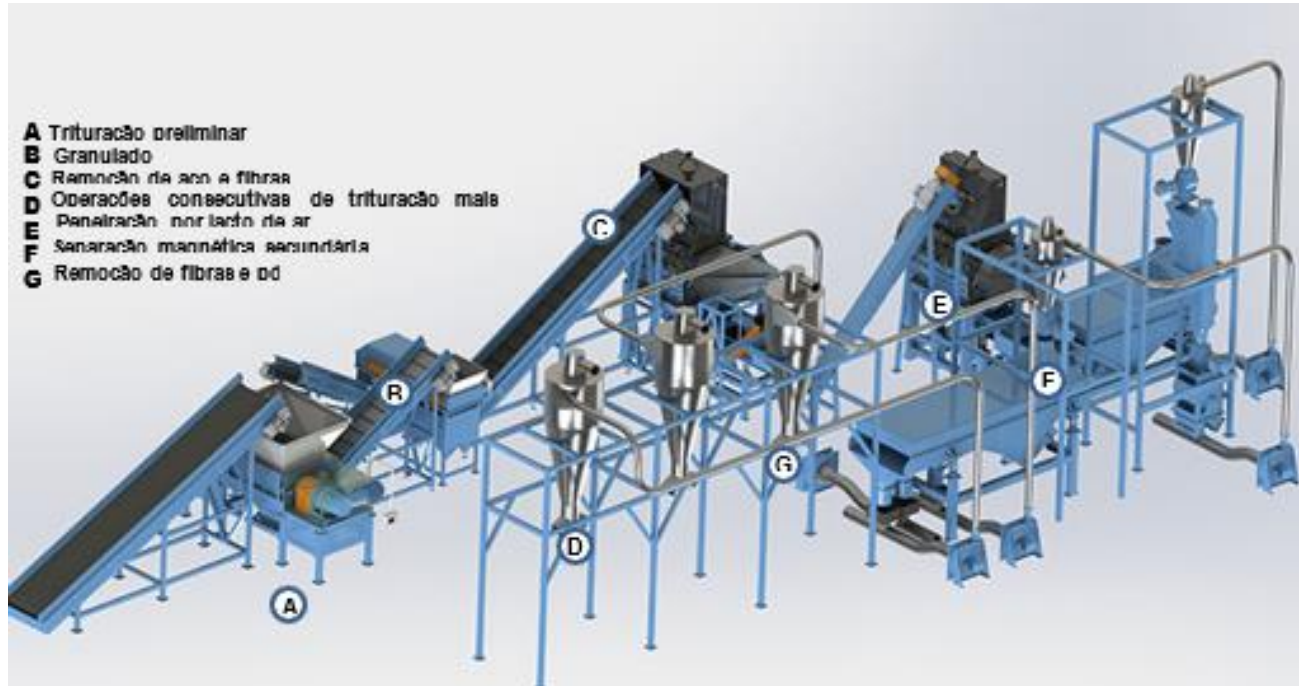
1 GRANULADO DE BORRACHA COMO MODIFICADOR DO BETUME

2 UTILIZAÇÃO DE BORRACHA REAGIDA E ACTIVADA (RAR)

- Projeto desenvolvido no âmbito do Protocolo IP-UL
- Propriedades do ligante (betume + RAR)
- Propriedades das misturas betuminosas com RAR

3 RECOMENDAÇÕES PARA PROJECTO COM MISTURAS BETUMINOSAS COM RAR

PRODUÇÃO DE GRANULADO DE BORRACHA RECICLADO DOS PNEUS USADOS



Esquema representativo do processo à temperatura ambiente
(adaptado de Reschner, 2006)

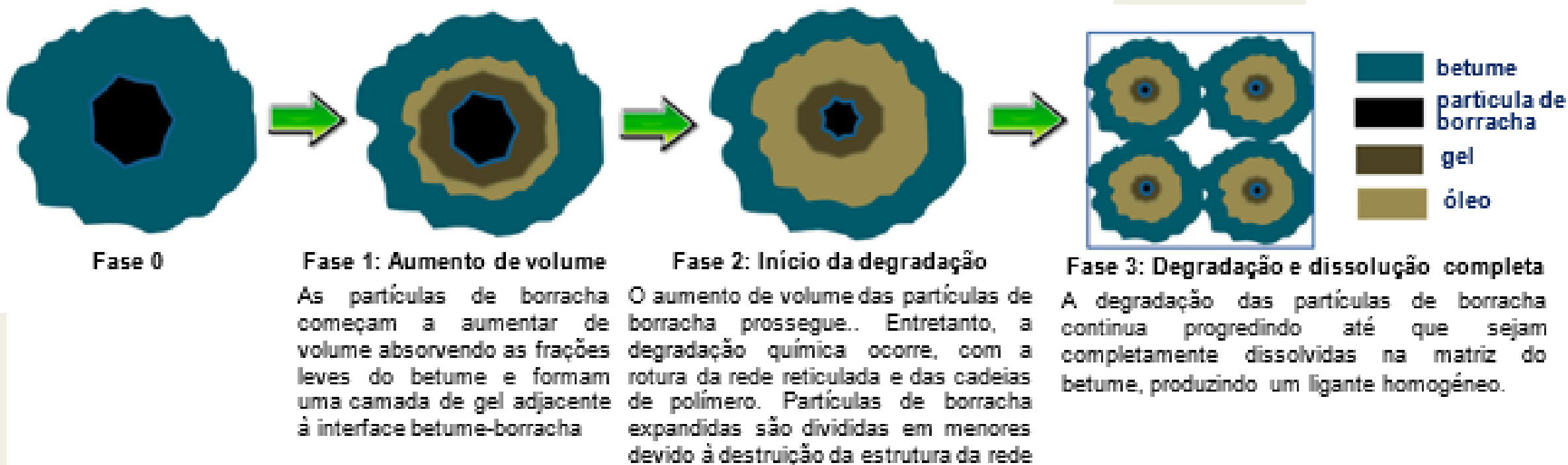
Categorias de materiais reciclados de pneus em fim de vida
de acordo com a DNP CEN/TS 14243 [2010]

Tipo de reciclado	Dimensão granulométrica
	mm
Corte	> 300
Shred	20 a 400
Chip	10 a 50
Granulado de borracha	0,8 a 20 (em diversas frações com dimensão diferente)
Pó de borracha	< 0,8

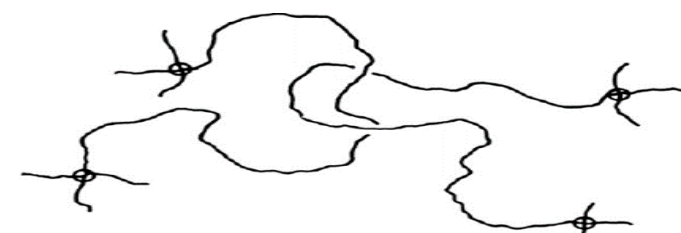
PRINCIPAIS PROCESSOS PARA GRANULAÇÃO



GRANULADO DE BORRACHA COMO MODIFICADOR DO BETUME



Estágios da interacção entre betume e borracha (adaptado Wang et al, 2020)



Rede permanente de ligações cruzadas
(adaptado Mark et al, 2013)

MODIFICAÇÃO DE BETUME COM BORRACHA RECICLADA DOS PNEUS USADOS

VIA SECA



A degradação e dissolução de borracha no betume é muito limitada

VIA HÚMIDA



A degradação e dissolução de borracha no betume é muito elevada. Processo realizado em central própria ou, no caso de uma percentagem elevada de borracha ($\geq 18\%$), realizado na central de fabrico das misturas betuminosas

VANTAGENS E DIFICULDADES NA VIA HÚMIDA

VANTAGENS

- i. Misturas com **elevada resistência à propagação de fendilhamento** para colocação em reforço de pavimentos fortemente fendilhados);
- ii. Misturas com **elevada resistência à deformação permanente**, a utilizar em locais com condições tráfego intenso e/ou temperaturas elevadas;
- iii. Misturas com **elevada resistência à fadiga**, a utilizar em locais com condições tráfego intenso;
- iv. Misturas com uma **elevada resistência ao envelhecimento e à oxidação**, a utilizar em camadas de desgaste;
- v. **Redução do ruído** gerado no contacto entre o pneu e a superfície do pavimento
- vi. **Redução dos impactes ambientais**, uma vez que a reciclagem da borracha de pneus usados promove uma significativa valorização energética dos resíduos de pneus e uma redução da utilização de recursos naturais

DIFICULDADES

- i. O fabrico de BB através do processo de modificação por via húmida envolve a utilização de temperaturas muito elevadas (superiores a 190 °C) durante **um período de reacção com duração significativa (45 minutos até 1 hora)**;
- ii. O processo de modificação por via húmida **obriga à instalação de uma unidade de fabrico do BB**, pelo que apresenta maior complexidade do que o fabrico com betumes não modificados;
- iii. Após longos períodos de armazenamento **existe a necessidade de reaquecer o BB**;
- iv. Uma **deficiente percepção da relação custo-desempenho**, uma vez que o custo das misturas betuminosas com BB é superior ao das misturas betuminosas com betumes não modificados (superior em 20% a 100%).

BORRACHA DE PNEUS REAGIDA E ACTIVADA – RAR



Betume puro



Granulado fino de borracha



Filer mineral ativo



RAR

RAR e seus materiais constituintes

- Introdução de um produto com potencial semelhante ao obtido na via húmida
- Resolução das dificuldades no fabrico do betume modificado com borracha (usuais na via húmida)
- Possibilidade de aumento na percentagem de granulado de borracha utilizada (aumento de cerca de 18% para cerca de 25%)

RAR pode ser produzida através da mistura a quente dos seus constituintes durante um curto período de tempo, sendo posteriormente realizada a ativação através de um processo especialmente concebido para formar um granulado de borracha seco ativado. O betume deve ser um betume puro com uma elevada penetração, embora em geral não superior à da classe 100/200

Uma composição típica de RAR corresponde a 62 a 65 % de borracha, 22 % de betume puro e 16 % de fíler mineral ativo. Após a reação e arrefecimento dos componentes no misturador, é adicionado um suplemento de 10 % de fíler no misturador para um envolvimento final de cada partícula de RAR, prevenindo fenómenos de coagulação.



Equipamento laboratorial para produção de RAR

CONFERÊNCIAS “ASPHALT RUBBER” E “RUBBERIZED ASPHALT RUBBER”

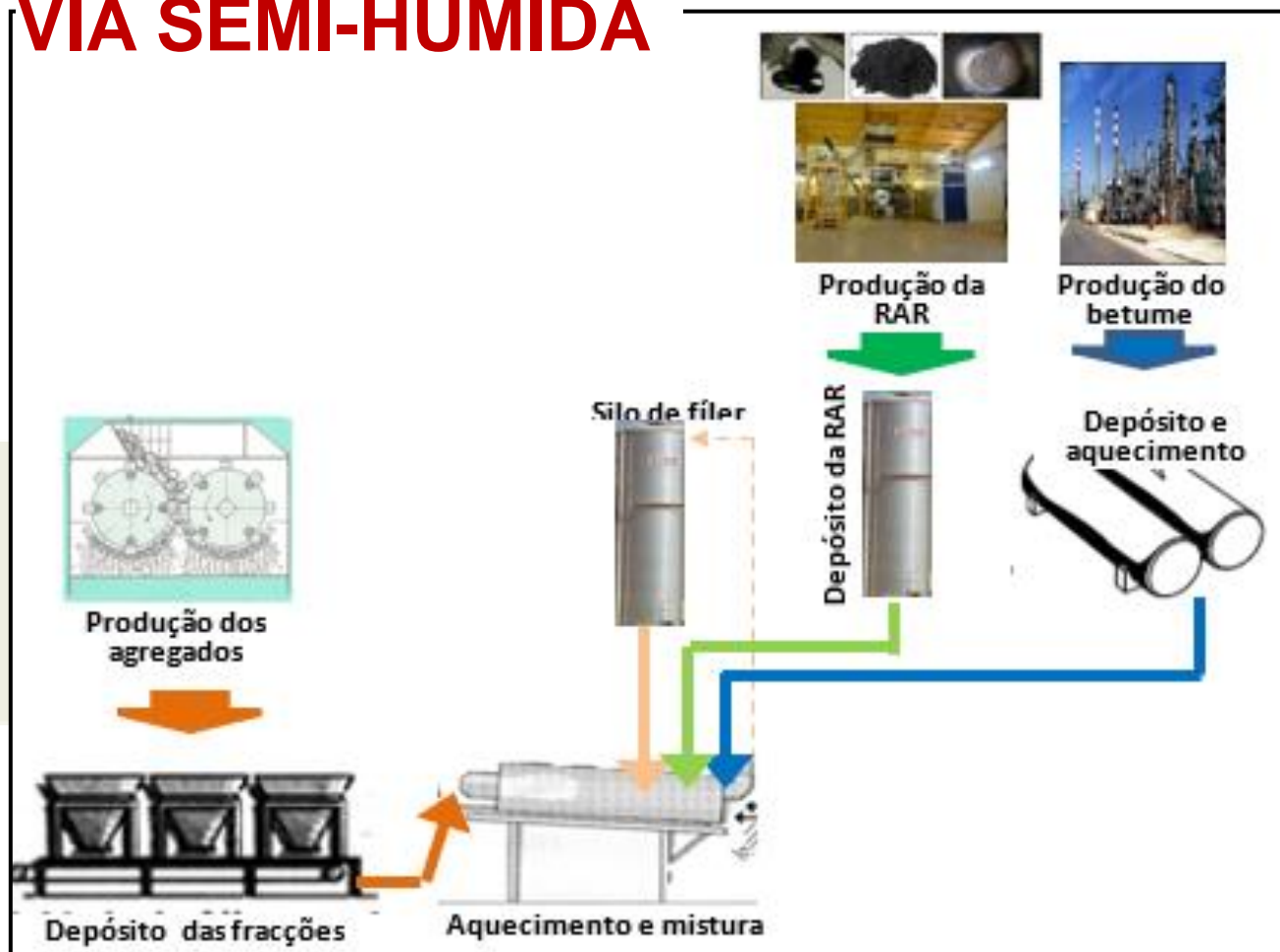
Inovação em Pavimentação
Misturas Betuminosas
com Borracha Reciclada e Ativada (RARI)



A experiência na utilização de betumes modificados com borracha encontra-se largamente divulgada nas actas das Conferências realizadas de três em três anos com a designação “Asphalt Rubber” entre 2000 e 2012 e “Rubberized Asphalt Rubber” em 2015 e em 2022, tendo a última conferência sido realizada em Málaga (Espanha) em 2022.

UTILIZAÇÃO DE RAR EM MISTURAS BETUMINOSAS

VIA SEMI-HÚMIDA



- A modificação do betume pela RAR não exige, tal como acontece no fabrico de betume modificado com alta percentagem de borracha utilizando a via húmida, a instalação de equipamento misturador adequado para o efeito.
- A RAR deve ser introduzida na misturadora da mistura betuminosas a quente após a entrada do agregado, incluindo fíler. A colocação do betume será realizada posteriormente.
- Deve existir um depósito alimentador para a RAR (por exemplo o silo usualmente utilizado para o fíler comercial, caso este esteja disponível, ou o depósito para a usual introdução de fibras), para colocação doseada e direta no misturador da central.
- A temperatura do betume deverá ser 175 a 185°C e a dos agregados deverá ser tal que a mistura betuminosa a temperatura de mistura seja de 180°C ± 2°C.,
- A mistura de RAR com o agregado, incluindo fíler, deve ser realizada durante um período não inferior a 8 segundos

PROJECTO IP-UL PARA UTILIZAÇÃO DE RAR EM MISTURAS BETUMINOSAS



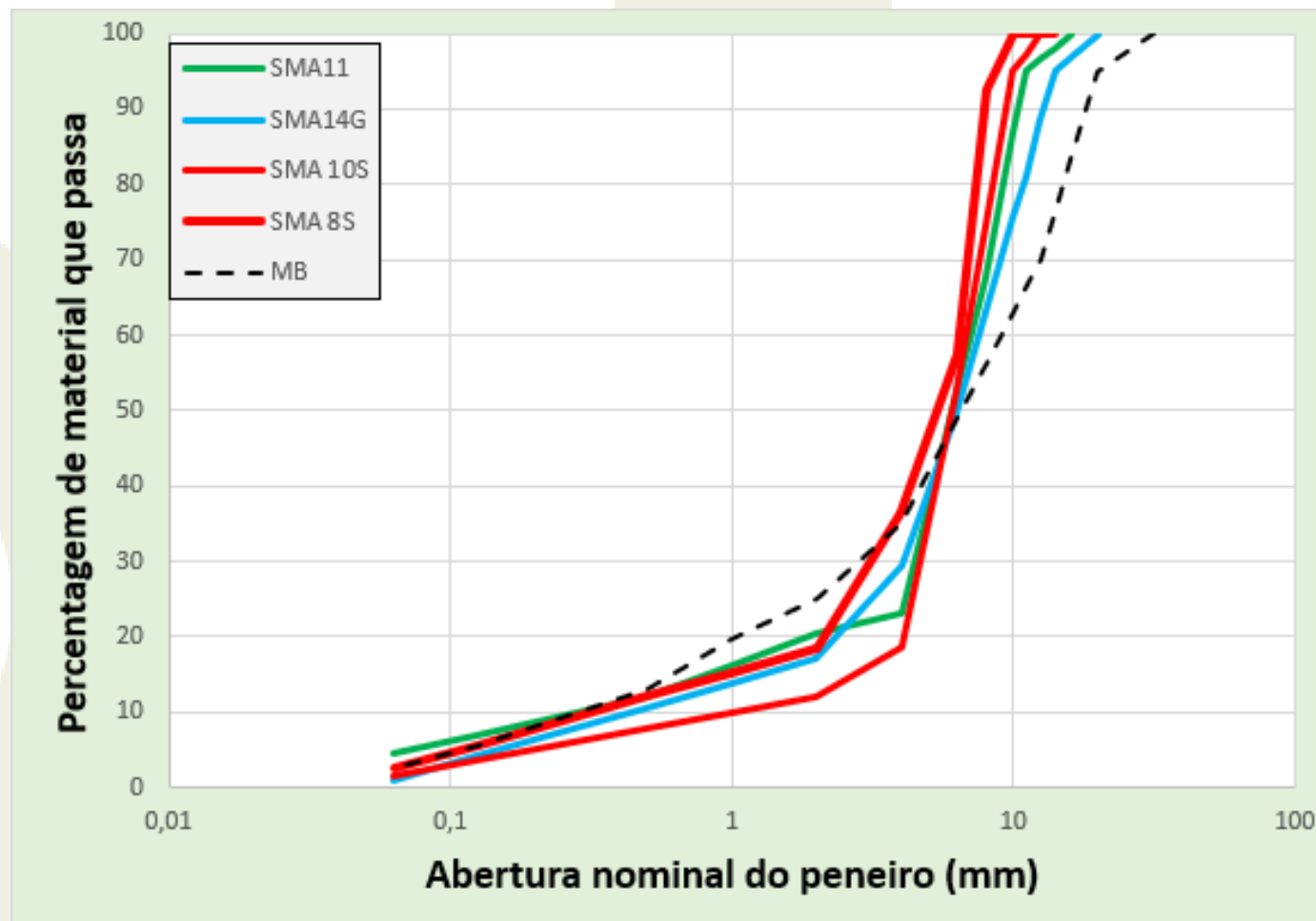
MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE RAR
CLÁUSULAS TÉCNICAS ESPECIAIS

NOVEMBRO 2022

- As especificações foram desenvolvidas em projeto envolvendo a Infraestruturas de Portugal (IP) e a Universidade Lusófona (UL)
- Participaram produtores, projetistas, empreiteiros
- Foram utilizados estudos já realizados e efetuados ensaios complementares
- Foi avaliado o desempenho
- Aplicado em obra rodoviária

UTILIZAÇÃO DE RAR EM MISTURAS BETUMINOSAS

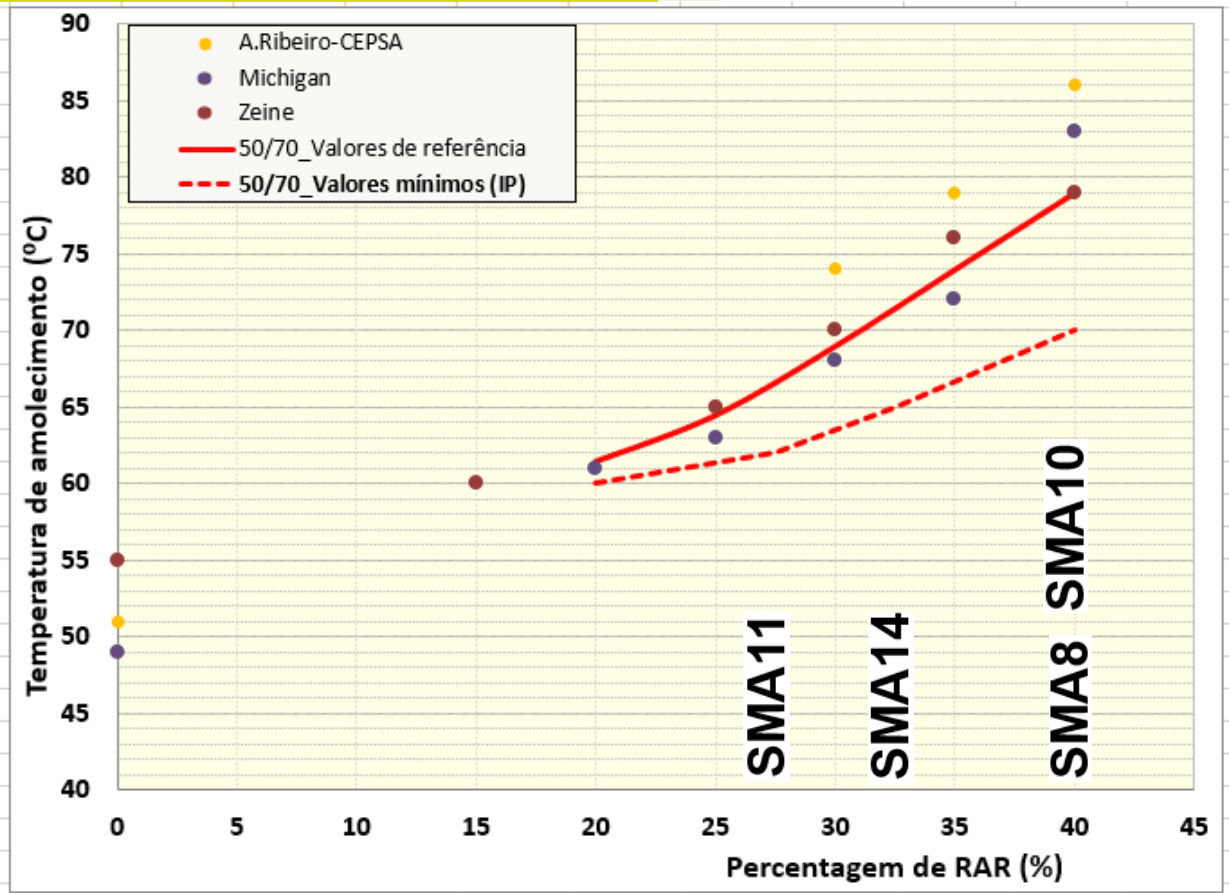
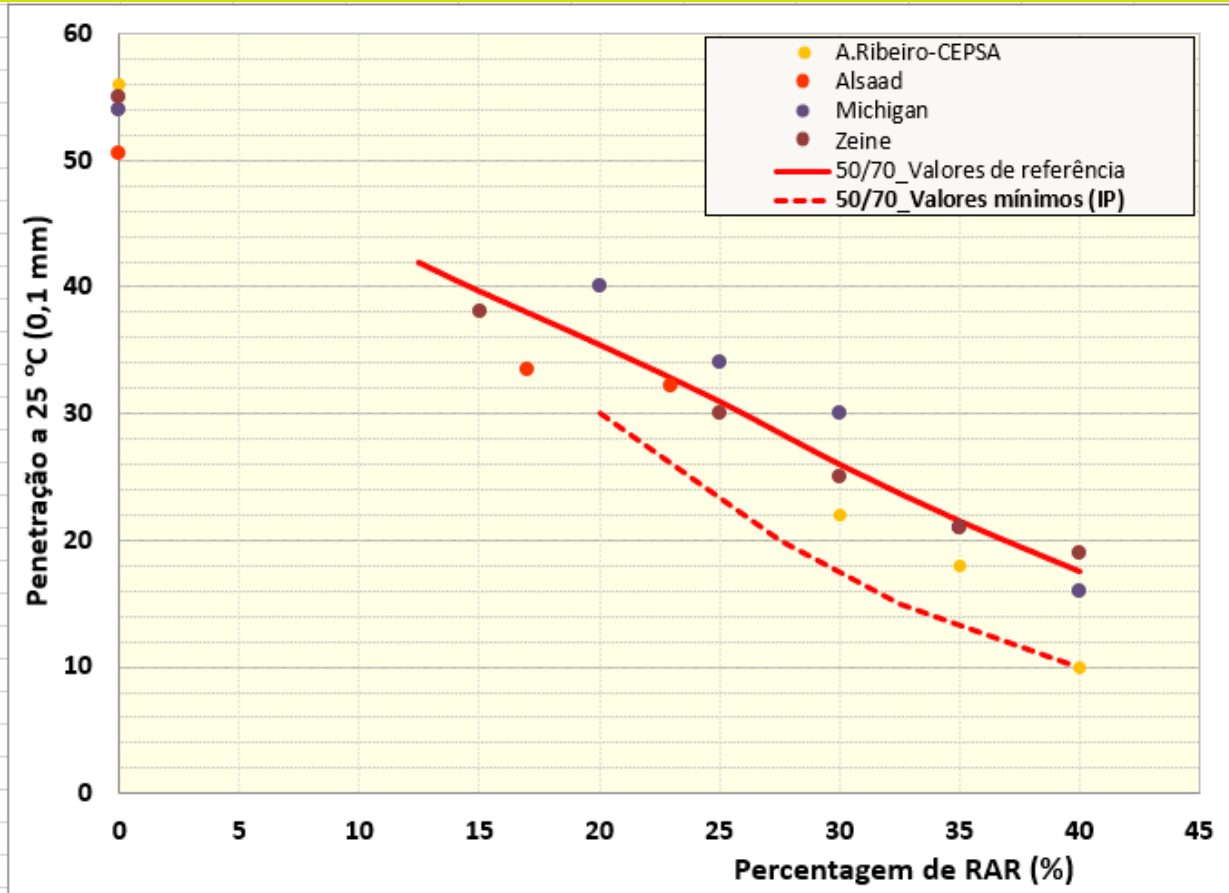
- As misturas têm um muito **elevado volume de vazios no esqueleto mineral** para permitir disponibilizar volume para elevadas dosagens de ligante
- A **borracha tem uma densidade** muito inferior ao do pó mineral, **de cerca de 1**
- Ao agregados têm uma **granulometria fortemente descontínua** e uma reduzida percentagem de finos
- Apesar de ser utilizada uma percentagem de ligante significativamente mais elevada que a das usuais misturas SMA, **não é necessária a utilização de fibras para limitar o escorrimento**
- A definição dos fusos granulométricos visou a obtenção de uma **espessura mínima da película de betume sobre as partículas de agregado de 12 μm**



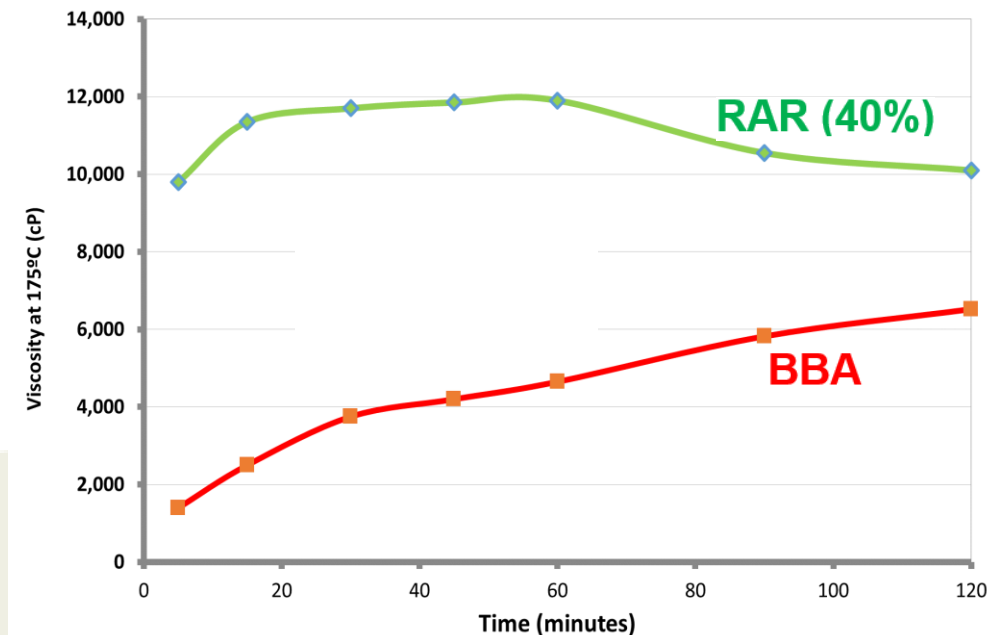
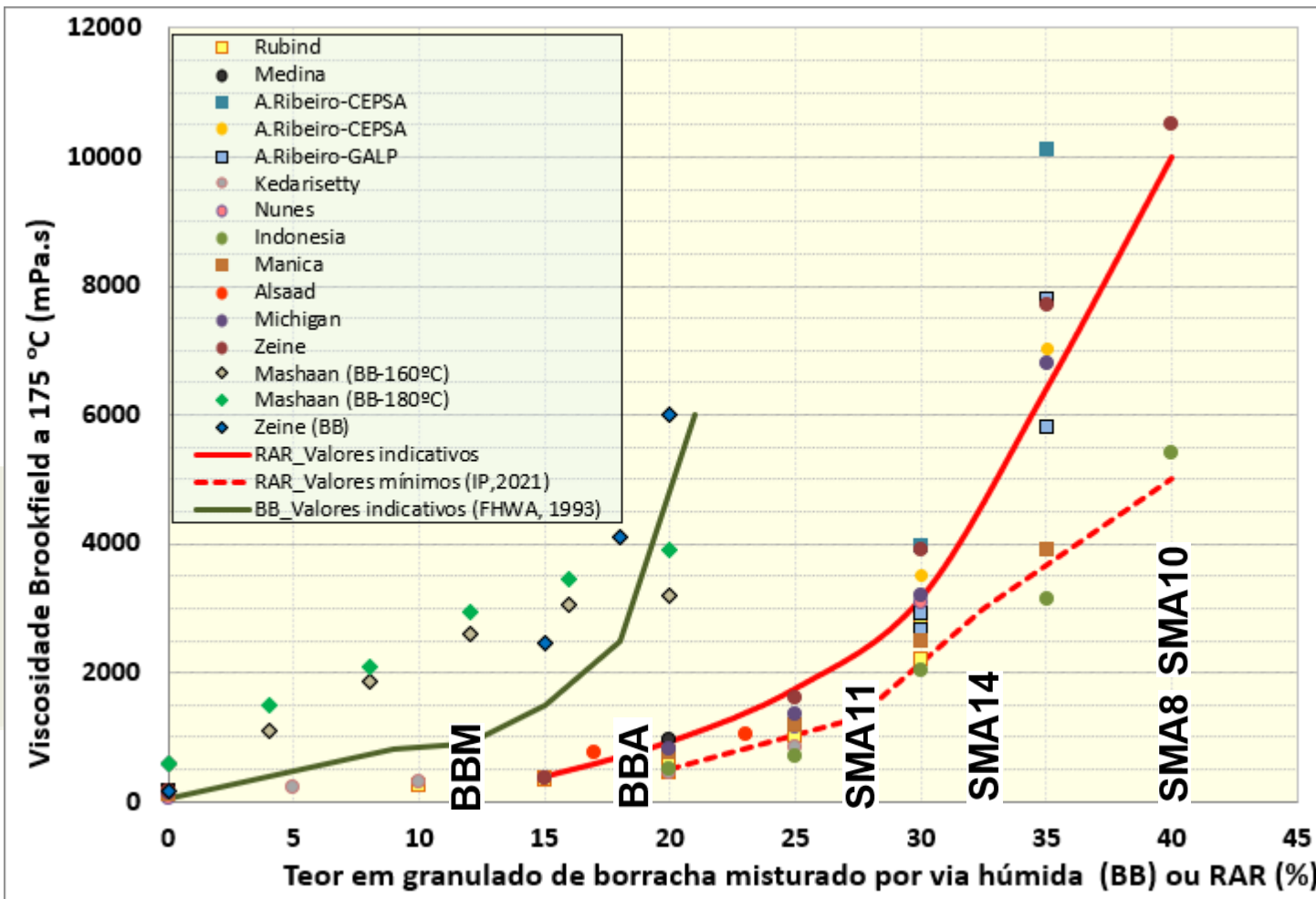
UTILIZAÇÃO DE RAR EM MISTURAS BETUMINOSAS

Mistura betuminosa	Designação abreviada	$D_{\text{máx}}$ do agregado (mm)	Percentagem ponderal de RAR no ligante	Camada	Espessura de projecto (m)
Macadame betuminoso com adição de RAR	MB 20 RAR	20	18 – 22	Ligação, Regularização, Base	0,05 a 0,09
Mistura betuminosa SMA com adição de RAR	SMA 11 RAR	11	25 – 30	Desgaste	0,03 a 0,05
Mistura betuminosa SMA de grande descontinuidade com adição de RAR	SMA 14G RAR	14	30 – 35	Desgaste	0,04 a 0,06
				Ligação, Regularização	0,04 a 0,06
Mistura betuminosa SMA <u>super</u> descontínua com adição de RAR	SMA 10S RAR	10	38 – 42	Desgaste	0,025 a 0,04
	SMA 8S RAR	8		Desgaste	0,02 a 0,04

PROPRIEDADES DO LIGANTE – VARIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA COM A TEMPERATURA

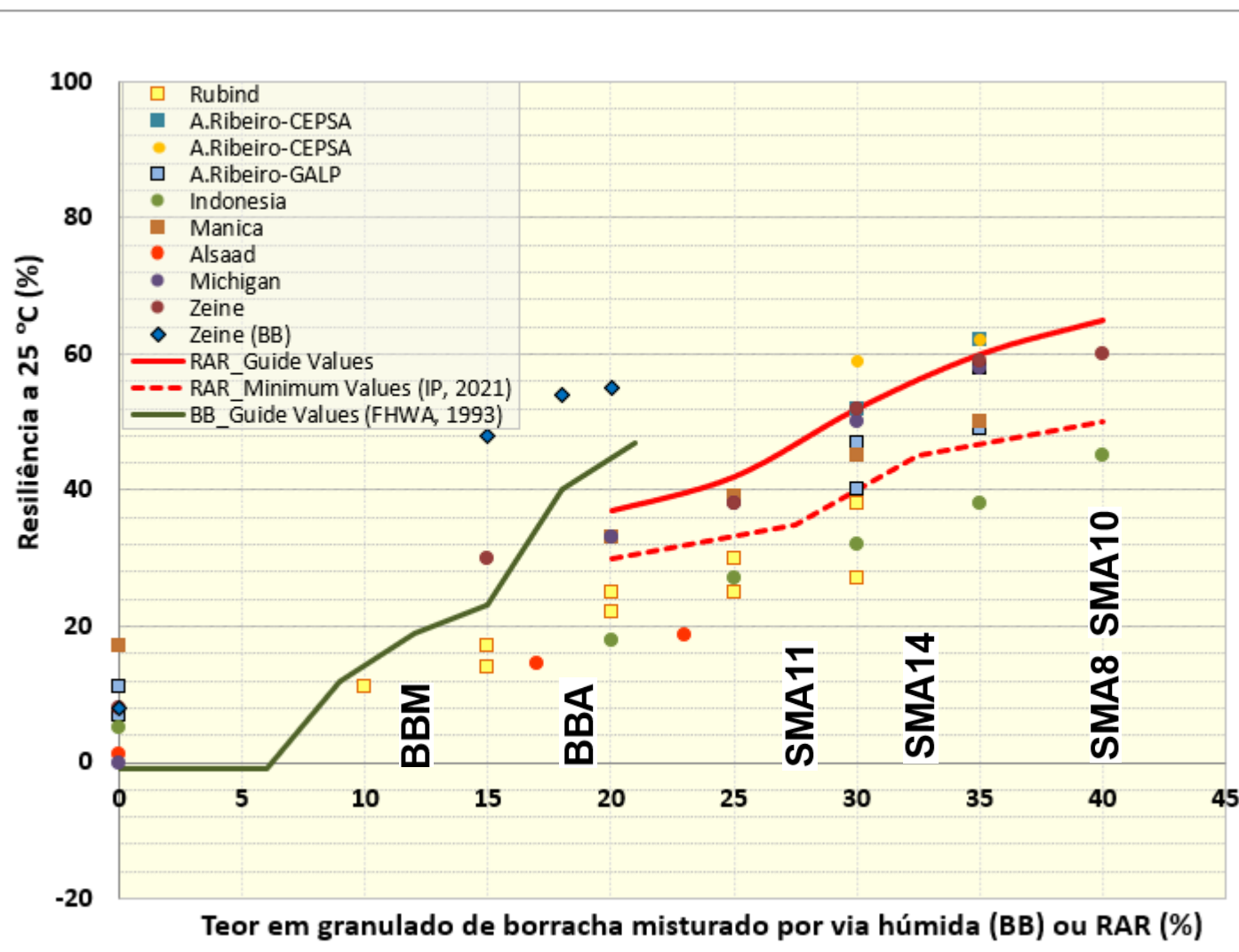


PROPRIEDADES DO LIGANTE – VISCOSIDADE



Varição da viscosidade do betume modificado em função do tempo de mistura

PROPRIEDADES DO LIGANTE – RESILIÊNCIA A 25°C



Utilização da especificação EN 13880-3:2003 (com procedimento idêntico ao da norma ASTM D 5329-96), que consiste em aplicar a uma amostra de betume, a 25°C, um deslocamento de 10 mm, por meio de uma esfera metálica medindo-se, em seguida, a recuperação elástica da amostra num intervalo de tempo de 20 segundos

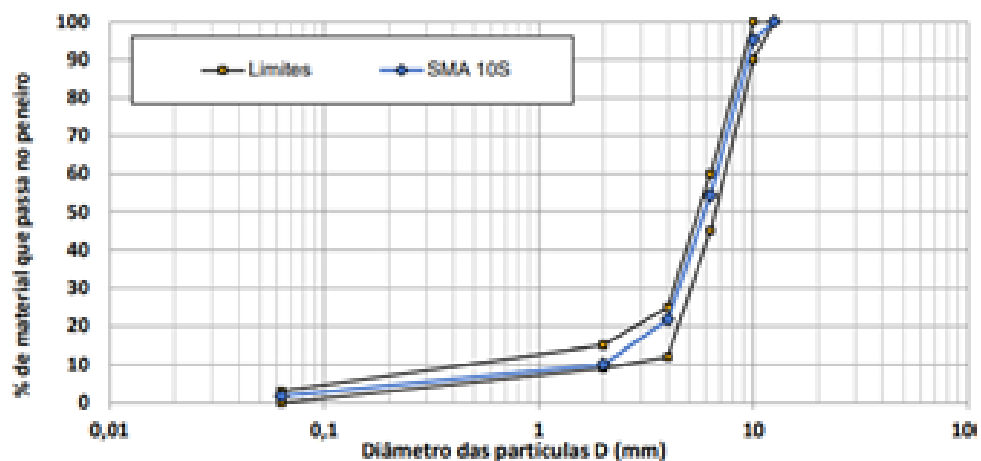
PROPRIEDADES DO LIGANTE – REQUISITOS DAS CLÁUSULAS TÉCNICAS ESPECIAIS TIPO

Requisitos/ Propriedades		Referência normativa	Unidade	Valores nominais para percentagem de ligante:			
				18 a 22 %	25 a 30%	30 a 35%	38 a 42%
Consistência à temperatura de serviço intermédia	Penetração a 25°C	NP EN 1426	0,1 mm	> 30	> 20	> 15	> 10
Consistência à temperatura de serviço elevada	Temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	≥ 60	≥ 62	≥ 65	≥ 70
Durabilidade (Resistência ao envelhecimento – RTFOT a 163°C, NP EN 12607-1)	Penetração retida	NP EN 1426	%	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60
	Aumento da temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	Classe 2 ≤ 10	Classe 2 ≤ 10	Classe 2 ≤ 10	Classe 2 ≤ 10
	Redução da temperatura de amolecimento	NP EN 1427	°C	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
	Variação de massa (valor absoluto)	NP EN 12607-1	%	Classe 4 ≤ 0,8	Classe 4 ≤ 0,8	Classe 4 ≤ 0,8	Classe 4 ≤ 0,8
Outros requisitos	Resiliência	ASTM D 5329	%	≥ 30	≥ 35	≥ 45	≥ 50
	Viscosidade dinâmica a 175°C após 5 min (VIS 5 min @ 175°C)	EN 13302	MPa.s	≥ 500	≥ 1300	≥ 3000	≥ 5000
	Viscosidade dinâmica a 175°C após 120 min	EN 13302	MPa.s	>VIS 5 min @ 175°C <1,5 x VIS 5 min @ 175°C			
	Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235

COMPOSIÇÃO DA MISTURA

Para a definição da composição são conduzidos estudos pelo método Marshall (EN 12697-30 e EN 12697-34) em associação com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho

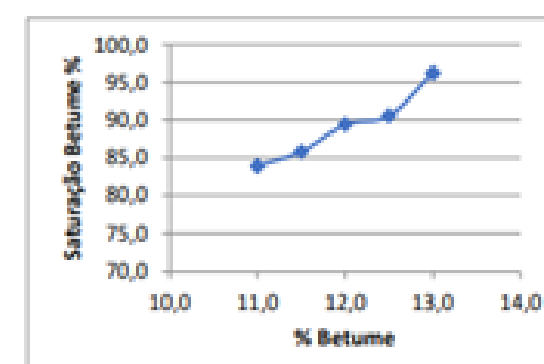
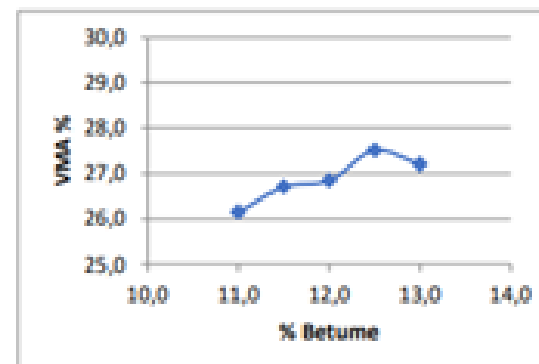
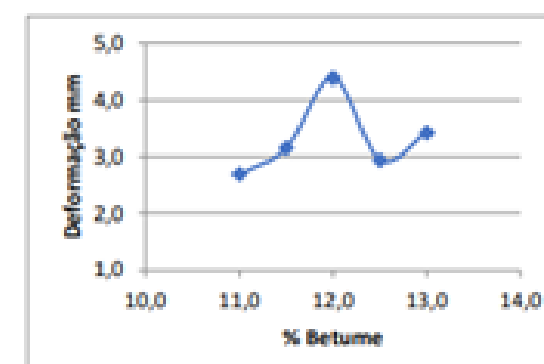
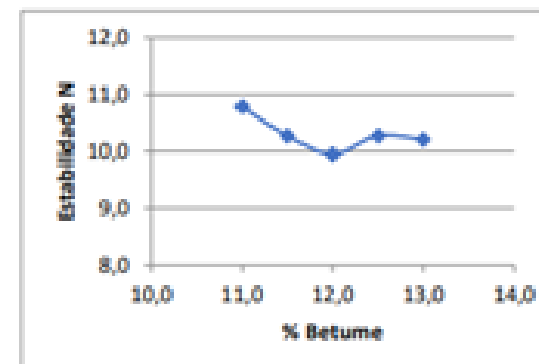
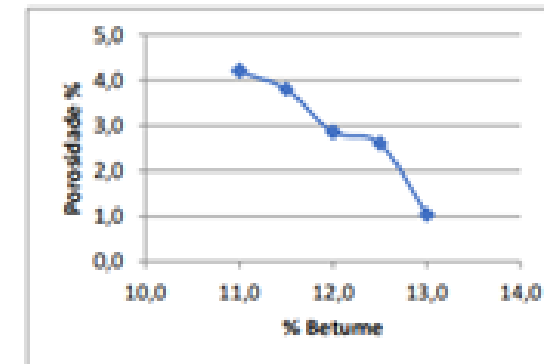
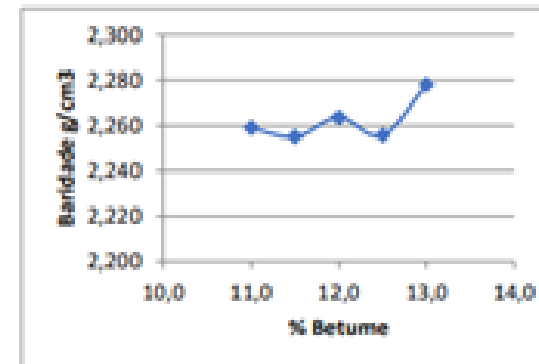
Formulação da mistura SMA 10S RAR na beneficiação da EN10



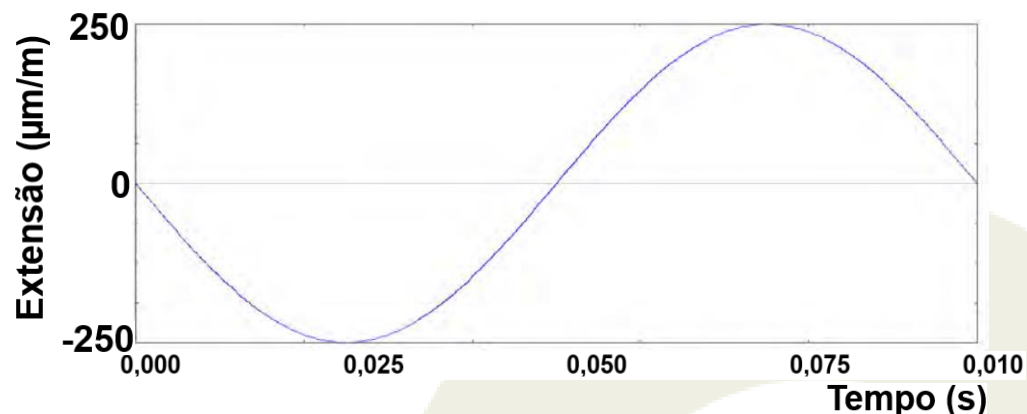
Fuso e granulometria da mistura

Fração granulométrica 0/4 mm	13%
Fração granulométrica 4/10 mm	87%
Percentagem de ligante (betume 50/70 + RAR) ..	11,5%
Percentagem de RAR no ligante	40%

Inovação em Pavimentação
Misturas Betuminosas
com Borracha Recogida e Ativada (RAR)

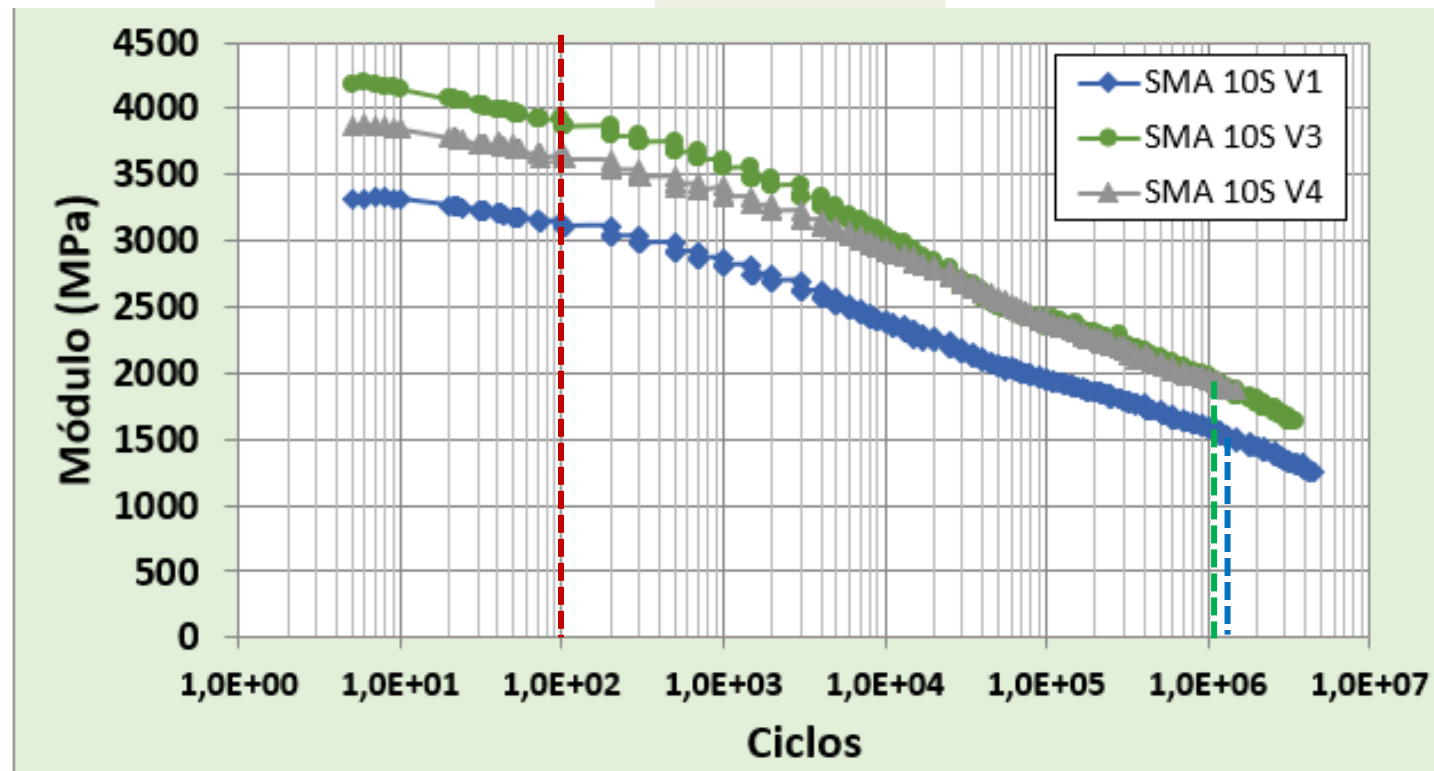


PROPRIEDADES DA MISTURA- DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA À FADIGA



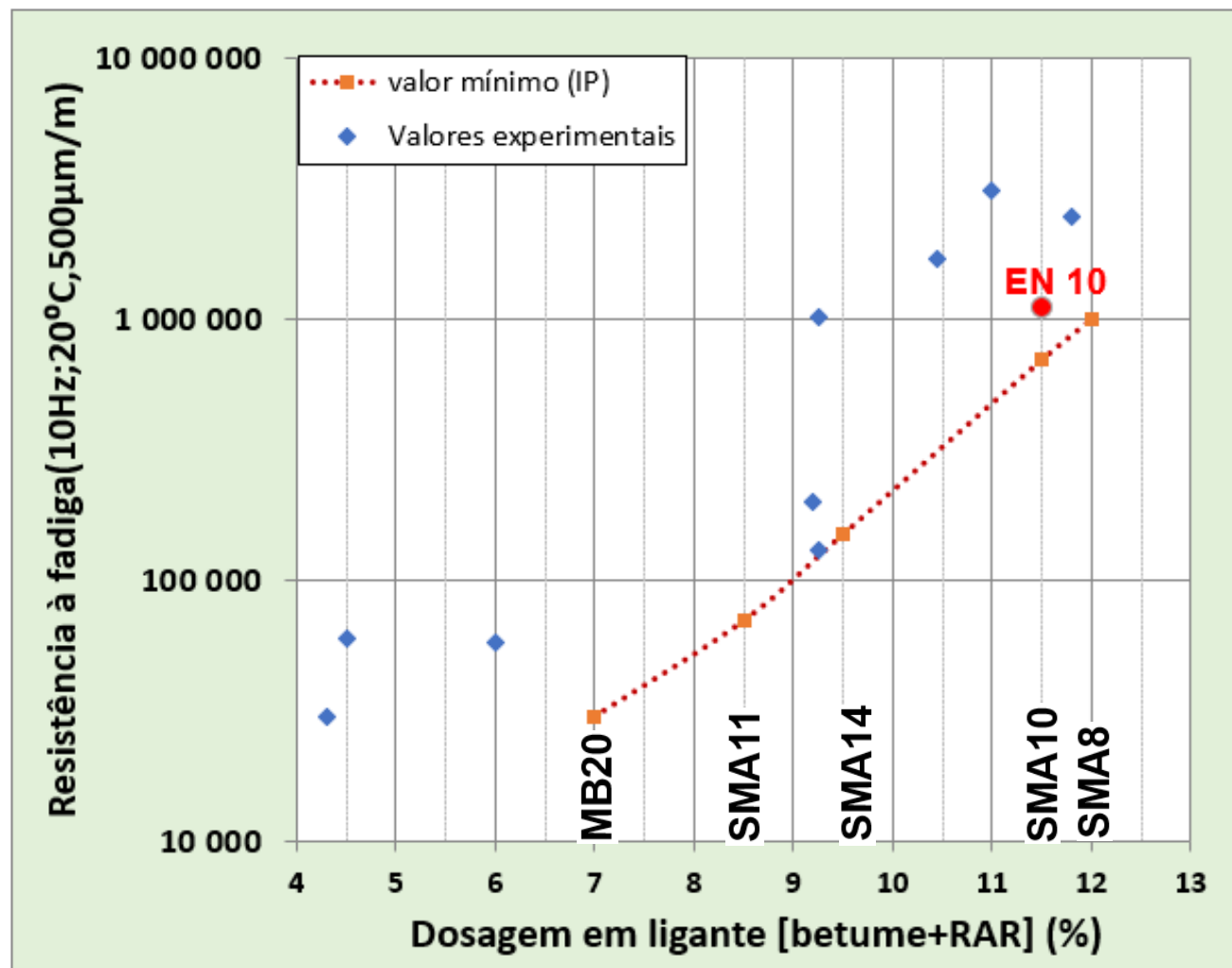
Utilização da especificação EN 12697-24:2012, com ensaio de flexão em quatro pontos sobre provetes prismáticos com frequência de 10 Hz, temperatura de 20°C e variação entre o máximo e o mínimo de extensão de $500 \mu\text{m/m}$.

O número de ciclos que exprime à resistência à fadiga é aquele em que o módulo decresce para metade do valor inicial. É considerado valor inicial do módulo om que é obtido após 100 ciclos.



Resultados obtidos em obra na EN 10, perto de Setúbal, em 2022

PROPRIEDADES DA MISTURA- REQUISITOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA



PROPRIEDADES DA MISTURA – REQUISITOS DAS CLÁUSULAS TÉCNICAS ESPECIAIS TIPO

Requisitos/propriedades para
misturas betuminosas SMA
super-descontínuas

Requisitos e propriedades		Ref. normativa	Condições específicas dos ensaios	Unidade	SMA 8S surf RAR	SMA 10S surf RAR
Características Marshall	Estabilidade, máx.	EN12697-34	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	kN	S _{max} 15	Valor a declarar
	Estabilidade, mín.			kN	S _{min} 7,5	S _{min} 8
	Deformação, máx.			mm	F5	F5
	Deformação, mín.			mm	F3	F3
Quociente Marshall				kN/mm	Valor a declarar	Valor a declarar
Vazios na mistura de agregados (VMA), mín.		EN12697-8	EN 12697-8 - Calculada com base na baridade máxima teórica ^(a) - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(b) determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	VM _{Amin} 24	VM _{Amin} 25
Porosidade, V _m		EN12697-8	EN 12697-8 - Calculada com base na baridade máxima teórica ^(b) - determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(c) - determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	V _{min} 1,5- V _{max} 3,5	V _{min} 3,0- V _{max} 5,5
Percentagem de ligante betuminoso (betume+RAR)		-	-	%	B _{min} 11,5	B _{min} 11,0
Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios de compressão Marshall, mín.		MIL-STD-620A	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	%	90	90
Resistência à Deformação Permanente ("Wheel-tracking")	Taxa de deformação máxima, WTS _{AIR}	EN12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, temperatura do ensaio a 60°C	mm/10 ³ ciclos de carga	0,08	0,06
	Profundidade de rodeira máxima, PRD _{AIR}			%	Valor a declarar	
Percentagem de ligante por ignição		EN12697-39	Determinada para a percentagem ótima de ligante da mistura em estudo (opt) e para mais quatro percentagens de ligante: opt- 1%; opt-0,5%; opt+0,5%; opt+1% ^(d)	%	Valor a declarar	
Resistência à fadiga (Número de ciclos, mín.)		EN12697-24	Ensaios com frequência de 10 Hz, temperatura de 20°C e extensão máxima de 500 x 10 ⁻⁶ ; o resultado é o valor médio de três provetes	ciclos de carga	1,5 x 10 ⁶	1,2 x 10 ⁶
Relação ponderal de RAR /ligante betuminoso		-		%	38 a 42	38 a 42
Sensibilidade à água, ITR, mín		EN12697-12	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 – 75 pancadas, temperatura do ensaio: 15°C	%	ITSR ₉₀	ITSR ₉₀
Escorrimento de betume, máx		EN 12697-18	Ensaio de Schellenberg em copo de vidro	%	0,3	0,3

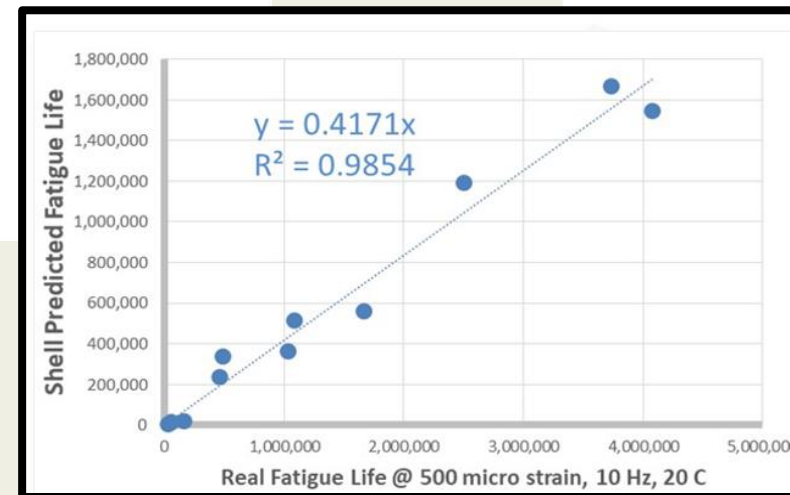
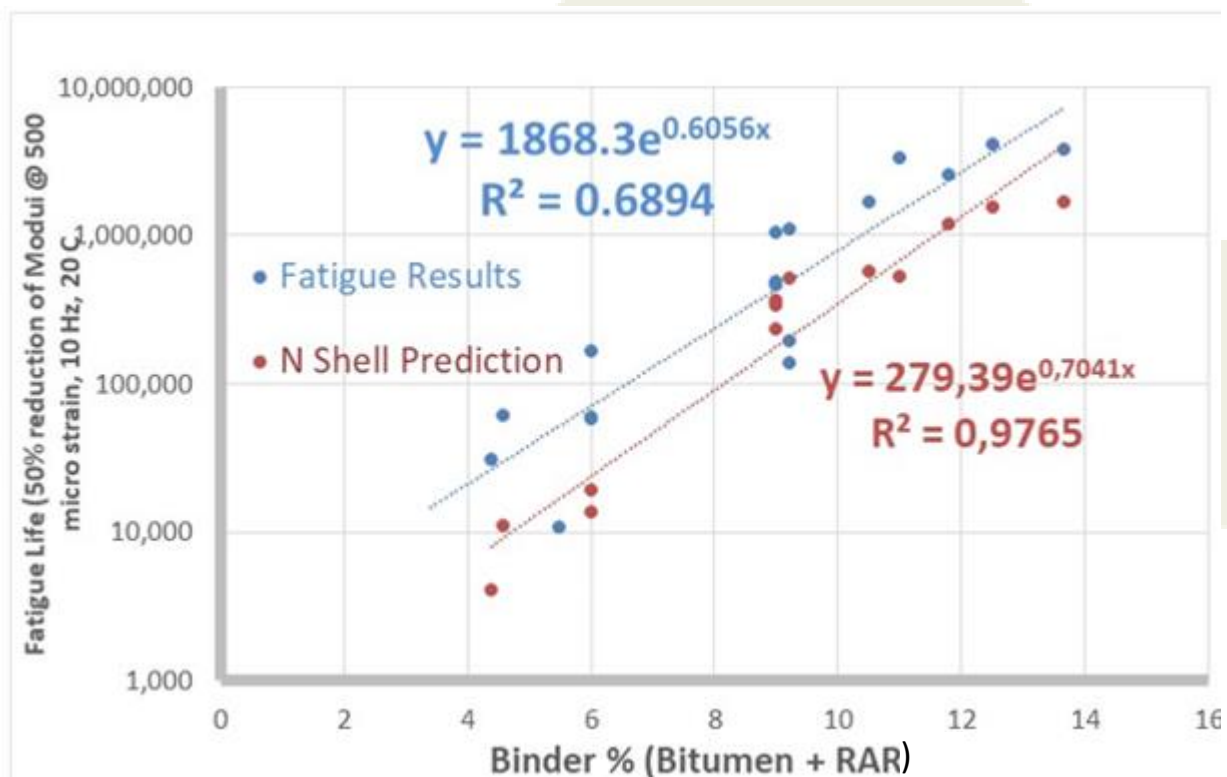
RECOMENDAÇÕES PARA PROJECTO– RESISTÊNCIA À FADIGA

Previsão de resistência à fadiga pela Shell:

$$\varepsilon_t = ((0,856 \times V_b + 1,08) \times E^{-0,36} \times N^{-0,2})$$

Em que E é o módulo da mistura (Pa), N é o número de aplicações da extensão ε_t até à ruína V_b o teor volumétrico em ligante

Considera-se ligante a soma do betume e de RAR



Os resultados indicam ser previsível uma resistência à fadiga de cerca de 41,7% da obtida pela aplicação da lei da Shell considerando como ligante a soma de betume e de RAR

RECOMENDAÇÕES PARA PROJECTO– RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DE FENDAS

An Overlay Design Method for Reflective Cracking

Jorge C. Pais*, Jorge B. Sousa**, George B. Way***, and Richard N. Stubstad****

* University of Minho
Department of Civil Engineering, 4800 Guimarães - Portugal
JPais@Eng.UMinho.pt

** Consulpav Portugal
Taguspark – Tecnologia I, n.º26, 2780 Oeiras - Portugal
JmbSousa@AOL.com

*** Arizona Department of Transportation, Materials Section
1221 North 21st Avenue – MD 068R
Phoenix Arizona 85009-3740, USA
GWay516855@AOL.com

**** Consulpav International
P.O. Box 700
Oak View, California 93022 - USA
Stubstad@AOL.com

- As metodologias actualmente utilizadas em Portugal no projecto de pavimentos não permitem avaliar a resistência à propagação de fendas
- A metodologia proposta por equipa liderada pela Universidade do Minho:
 - foi desenvolvida com base em cálculos pelo método dos elementos finitos
 - a previsão da actividade das fendas foi calibrada com medições “in situ”
 - foi realizado um ajustamento para atender ao desempenho “in situ”
 - considera diferentes níveis de fendilhamento
 - usa as características de deformabilidade obtidas em ensaios de carga

