



Análise da viabilidade técnica do uso de PEBD como estabilizante em misturas asfálticas tipo SMA

Cleiton Souza Esteves (1), Luiz Renato Steiner (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) cleiton-so.uza@hotmail.com, (2) luizsteiner@unesc.net

Introduzir polímero no ligante asfáltico proporciona características significantes, como uma maior aderência aos agregados, uma maior coesão das misturas, maior resistência ao envelhecimento e também um aumento na temperatura de amolecimento. O objetivo do presente trabalho foi a incorporação do polímero PEBD (polietileno de baixa densidade) no ligante asfáltico e avaliar as suas propriedades na mistura asfáltica do tipo Stone Matrix Asphalt ou Stone Mastic Asphalt (SMA). A adição do PEBD foi realizada nas proporções de 0,3, 0,5 e 0,7% em peso do ligante asfáltico CAP 50/70 por via processo úmido. As dosagens das misturas asfálticas foram feitas pelo método Marshall, após foram produzidos corpos de prova em seus teores ótimos, possibilitando à realização dos ensaios cântabro, resistência à tração por compressão diametral, mancha de areia e ensaio de escorrimento do ligante. Para as misturas asfálticas tida como referência, foi utilizado o ligante modificado com borracha. Através dos resultados obtidos, o ensaio cântabro se destaca, onde as misturas com adição de PEBD tiveram um desgaste maior que a de referência. O polímero também proporciona um aumento na rigidez das misturas, observada na resistência a tração por compressão diametral, onde a mistura que obteve a maior resistência foi a com adição de 0,5% de PEBD com um aumento de 114% em relação a mistura de referência. Através do ensaio da mancha de areia conclui-se que as misturas possuem uma boa rugosidade superficial, o que garante segurança e auxilia no escoamento da água superficial. No ensaio de escorrimento do ligante, o polímero não teve um bom desempenho como aditivo estabilizante. Considerando os resultados obtidos, o polímero demonstrou uma melhora principalmente na resistência a tração das misturas asfálticas do tipo SMA faixa II.

Palavras-chave: Desgaste; Macrot textura; Escorrimento; CAP 50/70; Polímero.

Technical viability analysis of the use of LDPE as a stabilizer in SMA asphalt mixtures

Abstract: Introducing polymer into the asphalt binder provides significant characteristics such as greater aggregate adhesion, greater cohesion of mixtures, increased aging resistance and also an increase in softening temperature. The objective of the present study is the incorporation of LDPE polymer (Low Density Polyethylene) in the asphalt binder and to evaluate its properties in the SMA type asphalt mixture. The addition of LDPE was performed

in the proportions 0,3, 0,5 and 0,7% by weight of the PAC 50/70 asphalt binder by wet process. The dosages of the asphalt mixtures were made by the Marshall method, after specimens were produced in their optimum contents, making possible the accomplishment of the tests of surface, tensile strength by diametric compression, sand stain and binder slip test. For asphalt mixtures taken as reference, the modified rubber binder was used. From the results obtained, the surface test stands out, where the mixtures with the addition of LDPE had a greater wear than the reference, the polymer also provides an increase in the stiffness of the mixtures, observed in the tensile strength by diametric compression, where the mixture that obtained the highest strength was the addition of 0,5% LDPE with 114% increase over the reference mixture. Through the sand stain test it was concluded that the mixtures have a good surface roughness, which ensures safety and aids in the flow of surface water. In the binder run-off test, it was noted that the polymer did not perform well as a stabilizing additive. Considering the result obtained, it was found that the polymer provided an improvement mainly in the tensile strength of SMA size range II asphalt mixtures.

Key-words: Wear; Macrotecture; Dripping; PAC 50/70; Polymer.

Introdução

As rodovias brasileiras foram criadas quando a demanda de transporte era muito menor, portanto, a partir do grande desenvolvimento econômico que o país teve, as rodovias não suportaram as cargas e os veículos que por elas trafegam. O transporte rodoviário possui uma infraestrutura de má qualidade, resultando em um grande aumento em custos operacionais e acidentes (CNT, 2017).

Historicamente as vias urbanas sofrem prematuramente com patologias como afundamento plástico em trilha de roda, escorregamento no revestimento, depressões e trincas. Segundo D' Antona et al (2011) a principal causa desses problemas é a má distribuição dos agregados finos, a ausência de agregados graúdos e ligantes com propriedade diferente da necessária para determinada situação.

Os pavimentos são compostos de várias camadas, sendo o revestimento inicialmente o responsável por absorver as cargas e também resistir a fatores climáticos como ação do sol e chuva. A maioria dos pavimentos brasileiros é caracterizado como flexíveis, onde são utilizados agregados de diversos tamanhos envolvidos com ligantes asfálticos. Essa combinação deve garantir flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga, ao trincamento térmico e impermeabilidade (BERNUCCI et al., 2008).

A busca por pavimentos que se adequam melhor as condições que são empregados, levou ao uso de asfaltos modificados. Segundo D' Antona et al (2011) introduzir o polímero no ligante asfáltico proporciona características significantes, como uma maior aderência aos agregados, uma maior coesão do ligante, maior resistência ao envelhecimento e também um aumento na temperatura de amolecimento. A característica final do pavimento depende do ligante asfáltico utilizado, do teor e o tipo de modificador utilizado, assim como o processo de fabricação da mistura (BRINGEL, 2007).

A mistura asfáltica do tipo Stone Matrix Asphalt ou Stone Mastic Asphalt (SMA) originou-se na Alemanha na década de 1960, e seu objetivo principal foi reduzir o desgaste superficial e as deformações permanentes. É um tipo de mistura asfáltica com elevado teor de agregados graúdos compondo a estrutura e isto permite um contato mais efetivo entre estes (ZAGONEL, 2013).

O diferencial do revestimento SMA é a granulometria descontínua, onde a maior parte dos agregados é graúda (entre 70% e 80%), fíller (10% passante na peneira nº200), entorno de 4% de vazios e ligante modificado com polímero. Devido a grande porcentagem de agregado graúdo, a deformação permanente desse tipo de mistura é reduzida, formando uma estrutura pétreia com o auxílio do fíller (PAZINATTO, 2014).

As misturas SMA exigem uma película maior de ligante asfáltico, com teor entre 1% e 1,5% maior do que as massas asfálticas convencionais, que possui o objetivo de inibir o desgaste dos agregados causado pelo contato dos grãos. A necessidade de usar polímero nesse tipo de mistura se dá pela necessidade de aumentar a consistência do ligante asfáltico (FILHO, 2004).

Segundo Silva (2005), o principal objetivo de desenvolver os ligantes asfálticos modificados com polímeros foi reduzir o afundamento por trilhas de rodas e a fadiga, pois o asfalto convencional não possui um bom desempenho nesses aspectos. O uso do polímero também possibilita o uso de revestimentos mais finos e com alta durabilidade.

Em virtude da grande proporção de agregados graúdos, há uma necessidade de aumentar a quantidade de ligante para que os vazios sejam preenchidos. Se isso for feito sem que a coesão do ligante seja modificada, há uma grande chance de ocorrer o escorrimento do



ligante. Normalmente são utilizados alguns tipos de fibra para resolver esse problema, a principal delas é a fibra de celulose que tem a função de manter a homogeneidade da mistura. (PAZINATTO, 2014). O asfalto modificado com borracha, já é uma alternativa utilizada no Brasil para aumentar a viscosidade do ligante e, portanto, elimina o uso de fibras de celulose.

As fibras são adicionadas as misturas SMA para evitar o escorrimento do ligante durante o processo de construção, especialmente durante o transporte. As fibras, geralmente não tem influência sobre o desempenho da mistura depois da compactação (FILHO, 2004).

O polímero sintético é o material mais utilizado para produzir asfaltos modificados, e o polímero que mais se destaca é o estireno-butadieno-estireno (SBS) (CUNHA et al, 2010). O polietileno de baixa densidade (PEBD) é outra opção de aditivo estabilizante para as misturas SMA e, portanto será utilizado nesta pesquisa.

O principal objetivo desta pesquisa é analisar a efetividade do uso do PEBD como aditivo estabilizante nas misturas asfálticas do tipo SMA, comparados os resultados com a Especificação Técnica ET-DE-P00/031 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo.

Materiais e Métodos

A figura 1 apresenta o fluxograma com as etapas do trabalho.

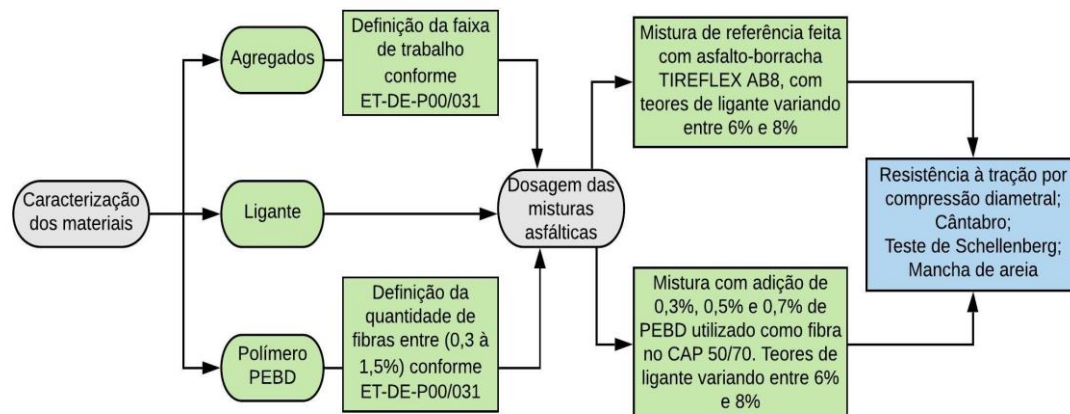


Figura 1. Fluxograma

Na presente pesquisa primeiramente foi feita a caracterização dos materiais utilizados, sendo estes, os agregados pétreos e o resíduo de PEBD. A caracterização e especificação dos ligantes já são definidas pelos fabricantes e estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2. Levando em consideração a Especificação Técnica ET-DE-P00/031 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, onde a mesma indica uma quantidade de fibras de celulose na mistura entre 0,3 a 1,5%, foram definidas as porcentagens de polímero que foram incorporadas por via úmida, em substituição parcial ao ligante convencional cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70, e a faixa de trabalho utilizada.

Posteriormente foram realizadas as misturas asfálticas experimentais do tipo SMA, onde se buscou um traço referência utilizando o asfalto-borracha TIREFLEX AB8 e, as outras misturas com as porcentagens de polímero incorporadas no CAP 50/70. Após esse procedimento e por meio da Dosagem Marshall, foi obtido o teor ótimo de ligante das misturas estudadas, permitindo assim a confecção de corpos de prova no teor ideal, necessários para obter os parâmetros físicos e mecânicos das misturas SMA.

Também foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, que consiste em analisar a resistência à tração indireta do corpo de prova cilíndrico da mistura asfáltica, por meio do ensaio de compressão diametral com carregamento estático crescente até a ruptura. Outra análise também realizada foi o desgaste da mistura, onde o ensaio Cântabro determina o desgaste por abrasão de uma mistura betuminosa com emprego da máquina Los Angeles.

A especificação Técnica do DER-SP especifica três tipos de ensaios para determinação do escorrimento do ligante asfáltico e conseqüentemente determinação do percentual de fibras, sendo estes ASTM D 9690, AASHTO T 305 e Ensaio de Schellenberg. Nesta pesquisa adotou-se o Ensaio de Schellenberg por questões de disponibilidade de equipamentos e utensílios em laboratório. Ele consiste em avaliar o escorrimento da mistura por meio de um béquer. Com as massas definidas é possível determinar a porcentagem de ligante asfáltico que ficou retido no béquer, e assim, verificar se a mistura se enquadrou dentro dos limites especificados por norma (PAZINATTO, 2014). A porcentagem de material escorrido é obtida através da Eq. 1.

$$E = 100 * \frac{m1-m2-m3}{m4-m2} \quad (1)$$

em que:

E = Porcentagem de material escorrido no béquer (%);

m1 = valor da massa inicial do béquer mais o material retido (g);

m2 = valor da massa inicial do béquer (g);

m3 = valor da massa do material seco na peneira após lavagem (g);

m4 = valor da massa inicial do béquer mais a amostra de mistura (g).

Outro ensaio utilizado na pesquisa foi o da Mancha de Areia. O método usado é uma adaptação e modificação do método ASTM-E-965-01 desenvolvido pela Arteris, que é uma das maiores companhias do setor de concessão de rodovias do Brasil. Este método é realizado para determinar a profundidade média da macrotextura da superfície de pavimentos. O conhecimento da profundidade da macrotextura do pavimento serve como uma ferramenta para caracterização de sua textura superficial. Quando em conjunto com outros testes físicos, os valores de profundidade da macrotextura obtidos através deste método de ensaio podem ser utilizados para determinar a capacidade de resistência à derrapagem, redução do spray em função da drenabilidade superficial do revestimento, a adequação dos materiais e técnicas construtivas (ARTERIS E 965 - 16).

O método consiste em despejar um volume de areia conhecido sobre a superfície limpa e seca do corpo de prova. Cuidadosamente, deve-se espalhar a areia de forma circular com o disco plano emborrachado, preenchendo os vazios superficiais até o surgimento das pontas dos agregados, formando uma superfície plana no círculo formado pela areia espalhada. Após medir e anotar o diâmetro da área circular coberta pela areia, com um mínimo de quatro medições espaçadas igualmente em torno da amostra e calcular o diâmetro médio através das quatro medições (ARTERIS E 965 - 16). A média da profundidade da macrotextura (HS) é determinada através da Eq. 2.

$$HS = 4 * \frac{V}{\pi * D^2} \quad (2)$$

em que:

HS = Espessura média da macrotextura do pavimento (mm);

V = Volume de areia (mm³);

D = Diâmetro médio da área recoberta pela areia (mm).

Os materiais utilizados na pesquisa foram: cimento asfáltico de petróleo convencional CAP 50/70 e modificado com borracha TIREFLEX AB8, polímero de PEBD, agregados pétreos e filler. Os agregados foram extraídos de uma jazida no município de Urussanga – SC, onde quem explora é a SBM – Sul Brasileira de Mineração LTDA. Foram utilizados Pedrisco e Pó de pedra conforme a Figura 3.

Os ligantes asfálticos utilizados foram do tipo asfalto-borracha, TIREFLEX AB8 para produzir os corpos de prova de referência e o cimento asfáltico de petróleo convencional CAP 50/70 como base para a incorporação de PEBD. Todos os dois tipos de ligante foram fornecidos pela SBM – Sul Brasileira de Mineração LTDA proveniente da refinaria da CBB ASFALTO, em Curitiba - PR. A Tabela 1 e 2 apresentam as propriedades físicas dos materiais.

Tabela 1. Caracterização do ligante CAP 50/70 (Fonte: SBM, 2018)

Ensaio	Unidades	Especificação	Resultados	Métodos
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	50 a 70	52	NBR 6576
Ponto de amolecimento, mín	°C	46	50,2	NBR 6560
Viscosidade Brookfield 135		> 274	330	
Viscosidade Brookfield 150	Cp	> 112	168	NBR 15184
Viscosidade Brookfield 177		57-285	62	
Ponto de fulgor	°C	> 235	> 236	NBR 11341
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-2,2	-1,1	-
Ductilidade a 25°C, 5cm/min	cm	> 60	> 145	NBR 6293
Solubilidade em Tricloroetileno	% (massa)	> 99,5	100	NBR 14855
Massa Específica a 25°C	Kg m ⁻¹	-	1,005	NBR 6296

Tabela 2. Caracterização do ligante TYREFLEX AB8 (Fonte: SBM, 2018)

Ensaio	Unidades	Especificação	Resultados	Métodos
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 70	51	NBR 6576
Ponto de amolecimento, mín	°C	> 50	55,4	NBR 6560
Viscosidade Brookfield	1450	800-2000	1445	NBR 15529
Recuperação elástica, 10 cm, 25°C	%	> 50	58	NBR 15086
Ponto de fulgor	°C	> 235	269	NBR 11341
Ensaio de separação de Fase	ΔP.A. (°C)	< 9	3,8	NBR 15166
Massa Específica a 25°C	Kg m ⁻³	-	1,024	NBR 6296

Como pode ser observado nas tabelas 1 e 2, os ligantes possuem características importantes e distintas, influenciadas pela adição do polímero (borracha) onde, o CAP 50/70 apresenta uma penetração maior, indicando ser mais mole e menos viscoso. O ponto de amolecimento menor indica que o ligante convencional é suscetível ao calor e um ponto de fulgor menor, faz com que este entre em combustão a uma temperatura de trabalho menor em relação ao ligante TYREFLEX AB8 que é modificado por borracha, ou seja, os polímeros empõem aos ligantes convencionais características físicas e mecânicas que melhoram seu desempenho e a vida útil dos revestimento.

O polímero PEBD utilizado nessa pesquisa foi fornecido por uma empresa localizada no município de Forquilha/SC, que recicla esse material e o transforma novamente em matéria prima para a indústria do segmento plástico. Este material foi obtido no processo de trituração de sacolas plásticas na forma de grãos de tamanhos irregulares, antes de serem transformados novamente em pellets de tamanhos e formas comerciais. A figura 2 apresenta o aspecto físico do PEBD.



Figura 2. Materiais empregados: (a) Polietileno de Baixa Densidade (PEBD).

O filler utilizado para fazer as misturas foi a cal hidrata do tipo CH-1, foi fornecida pelo Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMS), do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), localizado no município de Criciúma – SC. A Figura 3 c ilustra a cal hidratada.

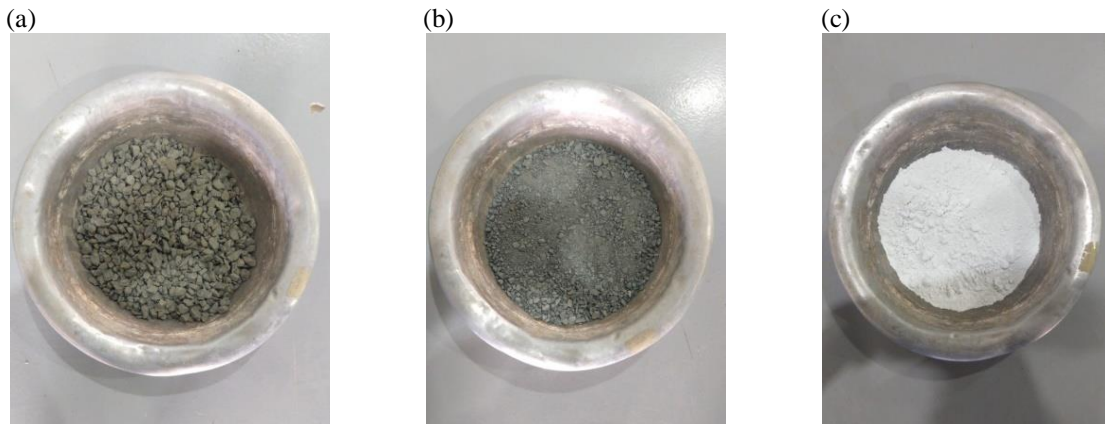


Figura 3. Materiais empregados: (a) Pedrisco, (b) Pó de pedra, (c) Cal hidratada do tipo CH-1.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física necessários para a aceitação do uso dos agregados e filler na mistura.

Tabela 3. Características físicas dos agregados e filler

Ensaio	Un.	Pedrisco	Pó de pedra	Cal CH-1	Método
Densidade real	Kg m ⁻³	3,175	-	-	DNER-ME 081/98
Densidade aparente	Kg m ⁻³	3,020	-	-	DNER-ME 081/98
Absorção	%	1,6	-	-	DNER-ME 081/98
Densidade real	Kg m ⁻³	-	2,872	-	DNER-ME 084/95
Equivalente de areia	%	-	63,32	-	DNER-ME 054/97
Densidade real	Kg m ⁻³	-	-	2,824	DNER-ME 085/94

Resultados e Discussões

Para as misturas estudadas, foram feitas incorporações de 0,3 0,5 e 0,7% de PEBD na substituição em peso da massa do ligante CAP 50/70 através do processo via úmida. Essas porcentagens foram escolhidas observando as especificações da ET-DE-P00/031, com o intuito de satisfazer a questão do escorrimento do ligante na mistura e ao mesmo tempo modificar o ligante com polímero que é uma exigência da mistura adotada. A mistura do polímero ao ligante foi realizada a uma temperatura de 175°C por meio da agitação com o auxílio de uma espátula em um recipiente, até que a mistura ficasse visualmente homogênea.

A Tabela 4 apresenta as faixas granulométricas do tipo SMA aceitáveis pelo Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, que apresenta quatro composições da mistura asfáltica baseada nas normas argentina e alemã.

Tabela 4. Faixas de trabalho para misturas SMA - (ET-DE-P00/031)

Peneiras de malha quadrada		Faixas – Porcentagem em massa, passando				
ABNT	Abertura (mm)	I	II	III	IV	TOLERÂNCIA
3/4"	19,00	100	-	-	-	-
1/2"	12,50	90-100	-	-	-	±7
3/8"	9,50	-	100	100	-	±7
5/16"	7,93	45-60	90-100	90-100	100	±5
Nº 4	4,75	30-40	30-45	30-52	90-100	±5
Nº 10	2,00	20-27	20-27	20-30	30-40	±5
Nº 200	0,075	9-13	9-13	7-12	7-12	±2

Após a análise de pesquisas já realizadas para misturas do tipo SMA, e em função da granulometria dos agregados disponíveis para esta pesquisa, optou-se por utilizar a faixa II da ET-DE-P00/031, visando a comparação com estudos já realizados. O traço da mistura ficou composto por 68% de pedrisco, 30% de pó de pedra e 2% de cal CH-1.

Após a escolha da faixa granulométrica e a definição das proporções de cada material, foi realizada a moldagem de quatro conjuntos de corpos de prova por meio da metodologia Marshall, conforme DNER-ME 043/95 com os teores de ligante de 6,0, 6,5, 7,0, 7,5 e 8,0%. A mistura de referência foi elaborada com o ligante TIREFLEX AB8. Os outros três conjuntos foram elaborados com ligante convencional CAP 50/70 com incorporação de 0,3, 0,5 e 0,7% de PEBD em substituição ao peso do ligante.

Para obtenção do teor ótimo de ligante nas misturas estudadas, seguiu-se as especificações técnicas do DER-SP. Para a mistura de referência e a mistura composta por ligante modificado com 0,3% de PEBD adotou-se um teor de 7%, e para a mistura composta por ligante modificado com 0,5 e 0,7% de PEBD, adotou-se um teor de 8% de ligante asfáltico, atendendo a especificação para um volume máximo de vazios na mistura de 4%.

Na mistura com teor de ligante de 8% e 0,5% de PEBD, percebe-se que o volume de vazios ficou maior do que 4%, não atendendo os requisitos da especificação técnica. Acredita-se que esse volume de vazios maior tenha ocorrido por influencia da temperatura que os

corpos de prova foram compactados, pois no momento da compactação observou-se que o ligante estava muito fluido a ponto de exsudar no molde, então a temperatura foi reduzida e como consequência a viscosidade do CAP aumentada e isto influencia no grau de compactação das misturas. As misturas com 0,3% e 0,7% de PEBD atenderam o volume máximo de vazios (Vv). A Tabela 5 mostra os percentuais de Vv para cada mistura estudada. Apesar da mistura com 0,5% de PEBD ficar com um Vv maior, fica evidenciado que o aumento da incorporação de PEBD impõe nas misturas uma redução de vazios.

Tabela 5. Volume de vazios

Amostras	Teor de ligante (%)	Densidade aparente (g/cm ³)	Densidade máx teórica (g cm ³)	Volume de vazios (%)
REF.	6,0	2,51	2,72	7,80
	6,5	2,50	2,69	7,40
	7,0	2,57	2,67	3,80
	7,5	2,56	2,65	3,10
	8,0	2,57	2,62	2,10
0,3% PEBD	6,0	2,53	2,72	6,80
	6,5	2,54	2,69	5,90
	7,0	2,57	2,67	3,80
	7,5	2,55	2,65	3,50
	8,0	2,54	2,62	3,30
0,5% PEBD	6,0	2,50	2,72	7,90
	6,5	2,54	2,69	5,80
	7,0	2,54	2,67	4,80
	7,5	2,53	2,65	4,50
	8,0	2,51	2,62	4,20
0,7% PEBD	6,0	2,53	2,72	6,90
	6,5	2,54	2,69	5,70
	7,0	2,54	2,67	4,90
	7,5	2,53	2,65	4,40
	8,0	2,53	2,62	3,50
ET-DE-P00/031				< 4%

Na Tabela 6 são apresentadas a média dos resultados de desgaste cântabro e resistência à tração por compressão diametral nos seus devidos teores ótimos de ligante asfáltico.

Tabela 6. Resultado dos ensaios de cântabro e resistência à tração por compressão diametral

Amostras	Teor de ligante (%)	Cântabro (%)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
REF.	7,0	2,75	0,42
0,3% PEBD	7,0	5,86	0,41
0,5% PEBD	8,0	6,12	0,48
0,7% PEBD	8,0	3,08	0,44
ET-DE-P00/031			> 0,60

O tipo de mistura escolhida se trata de uma mistura densa, portanto, não há especificação quanto ao desgaste da mesma, no entanto este ensaio permite avaliar entre as misturas estudadas se a introdução do polímero PEBD impõe maior coesão na mistura impedindo o arrancamento de partículas e dos agregados graúdos. Das misturas com adição de polímero, a mistura com 0,7% de PEBD foi a que obteve o menor desgaste, com 112% em relação a mistura de referência. Isso pode ter ocorrido pois a mistura ficou mais densa e rica em ligante, melhorando a coesão das partículas do esqueleto pétreo. A mistura com 0,3% de PEBD teve um desgaste de 213%, já a mistura com 0,5% de PEBD teve o maior desgaste de 222% em relação a mistura de referência. Isso pode ter ocorrido pelo fato da mistura ter apresentado um maior volume de vazios, favorecendo o arrancamento de agregados e partículas da mistura. Esse comportamento das misturas modificadas com PEBD em perder mais massa devido a um maior desprendimento das partículas em relação a amostra confeccionada com ligante modificado por borracha, se deve a maior rigidez e a perda parcial de suas propriedades elásticas, que o PEBD impôs ao ligante, diminuindo sua capacidade de absorver impactos e manter mais coesa a mistura.

No ensaio de resistência a tração por compressão diametral, observa-se que a resistência tende a aumentar quando a porcentagem de PEBD também aumenta. Percebe-se que a mistura de referência atingiu um resultado praticamente igual a mistura com 0,3% de PEBD, enquanto a com 0,5% e 0,7% de PEBD apresentaram maior resistência a tração, mas mesmo assim nenhuma mistura atendeu o requisito da ET-DE-P00/031 de uma resistência mínima de 0,60 MPa. Sabe-se que a adição de PEBD ao ligante asfáltico, faz com que o mesmo tenha uma maior resistência a penetração, deixando o ligante com uma maior rigidez e resistente as deformações permanentes, contudo, a mesma perde comportamento elástico e isso pode refletir em uma redução na resistência a fadiga (recuperações elásticas) (QUINTANA, GÓMEZ e LÓPEZ 2010). Independentemente dos resultados não atingirem o mínimo especificado, o ligante modificado por PEBD promove uma maior resistência a tração da mistura em relação a mistura de referência elaborada com ligante modificado com borracha.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da profundidade média da macrotextura superficial dos corpos de prova e a classificação da macrotextura.

Tabela 7. Resultado do ensaio da Mancha de Areia

Amostras	Teor de ligante (%)	Profundidade média Da macrotextura (mm)
REF.	7,0	0,77
0,3% PEBD	7,0	0,85
0,5% PEBD	8,0	1,12
0,7% PEBD	8,0	1,09
ET-DE-P00/031		>1,20
Classificação da Macrotextura		
Textura Superficial	Altura média de mancha de areia(HS) (mm)	
Muito fina ou muito fechada	HS <= 0,20	
Fina ou fechada	0,20 < HS <=0,40	
Média	0,40 < HS <=0,80	
Grosseira ou aberta	0,80 < HS <= 1,20	
Muito grosseira ou muito aberta	HS > 1,20	
Fonte: Bernucci et al. (2008)		

O ensaio consiste no espalhamento circular de um volume conhecido de areia na superfície limpa e seca do corpo-de-prova conforme Figura 4. Após é realizado quatro medidas em diferentes pontos do diâmetro da mancha que se formou com o espalhamento da areia, obtendo-se a média destes e realizando o cálculo da profundidade média de areia.



Figura 4. Ensaio da Mancha de Areia – Macrotextura

Segundo a ET-DE-P00/031, a altura de areia determinada no ensaio de mancha de areia deve ser superior a 1,2 mm, caracterizando uma classe de textura superficial muito grossa, que fornece um melhor atrito entre o pneu e o revestimento e também um maior escoamento da água superficial, o que evita a formação do spray de água provocado pela passagem dos veículos. Observa-se que os resultados obtidos não satisfazem a exigência da especificação técnica. A mistura de referência teve sua textura superficial classificada como

média, já as outras misturas com adição de PEBD, tiveram sua superfície caracterizada como grosseira ou aberta. Segundo Bernucci et al (2008), a classe de macrotextura deve ser no mínimo média, pois abaixo disso a mistura tende a ser fechada, o que aumenta o risco de hidroplanagem. Portanto, mesmo não atendendo a especificação, todas as misturas possuem uma classe que garante certa segurança, pois fornece um bom atrito entre o pneu e o revestimento, e também auxilia o escoamento da água superficial.

Para o Ensaio de Schellenberg, primeiramente deve-se preparar as misturas asfálticas no seu devido teor ótimo de ligante, depois se adiciona 1,0 Kg da mistura asfáltica no interior de um béquer previamente tarado. Posteriormente a mistura deve ser levada à estufa, onde permanecerá por 1 hora em uma temperatura de compactação. Após esse tempo, o béquer deve ser retirado da estufa e virado com a base para cima durante 10 segundos, o béquer é então pesado novamente juntamente com o material que ficou retido nas suas paredes. (PAZINATTO, 2014)

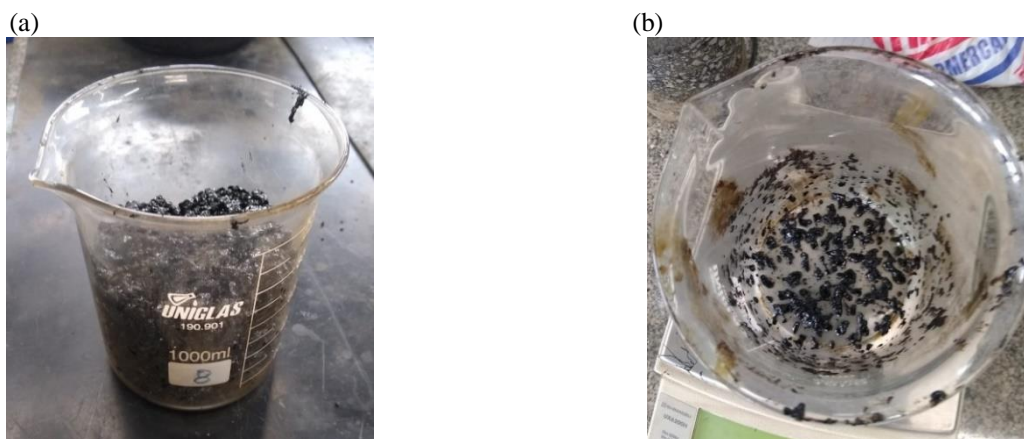


Figura 5. (a) Mistura asfáltica pronta, (b) Béquer com resíduo de ligante asfáltico. (Fonte: Autor)

Após pesar o béquer com o material retido, o mesmo foi lavado com percloroetileno para eliminar as partículas de agregado que ficaram retidas junto com o ligante. Os agregados foram pesados e descontado do peso do béquer mais o material total retido para que pudesse encontrar somente a quantidade de ligante que ficou retido no béquer, ou seja, a quantidade que escorreu.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados do ensaio de escorrimento de Schellenber.

Tabela 8. Resultado do Ensaio de Schellenberg

Amostra	Teor de ligante (%)	Escorrimento (%)
REF.	7,0	0,15
0,3% PEBD	7,0	0,28
CAP 50/70	7,0	0,47
0,5% PEBD	8,0	0,68
0,7% PEBD	8,0	0,87
CAP 50/70	8,0	1,03
0,3% Celulose (Blasius 2016)	8,0	0,42
0,5% Celulose (Blasius 2016)	8,0	0,25
0,7% Celulose (Blasius 2016)	8,0	0,21
0,3% Lã de Vidro (Blasius 2016)	8,0	0,43
0,5% Lã de Vidro (Blasius 2016)	8,0	0,15
0,7% Lã de Vidro (Blasius 2016)	8,0	0,08
ET-DE-P00/031		<0,30

A partir dos resultados encontrados, percebe-se que a mistura de referência e a mistura com 0,3% de PEBD atendem os parâmetros do Ensaio de Schellenberg. As demais misturas não atenderam a especificação do método. Isso pode ter acontecido por as misturas com 0,5% e 0,7% de PEBD terem teores ótimos de 8,0%, consequentemente a quantidade de material pétreo é menor, o que proporciona um maior escorrimento, portanto, acredita-se que a quantidade de polímero não foi suficiente para essa quantidade de ligante na mistura. Também foram feitas duas misturas somente com o CAP 50/70 com os teores ótimos de 7,0 e 8,0% para comparar com as misturas com PEBD, para saber o quanto o polímero influencia no escorrimento. Consta-se que a mistura com teor de ligante de 7,0% de CAP 50/70 teve um escorrimento de 0,47% e com a adição de 0,3% de PEBD teve um escorrimento de 0,28%, portanto, o polímero reduziu o escorrimento em 60%, atendendo a especificação.

Comparando os resultados obtidos com os resultados encontrados por Blasius 2016, onde ele utilizou misturas com adição de fibra de celulose e lã de vidro com teor de ligante asfáltico de 8%, nota-se que as misturas com 0,5% e 0,7% de PEBD possuem um desempenho baixo quanto ao escorrimento em relação as misturas com adição de fibra de celulose e lã de vidro.

Esperava-se que as misturas com maiores porcentagens de PEBD aumentassem a viscosidade do ligante fazendo com que o mesmo tivesse um menor escorrimento. Porém, nota-se que quanto maior a quantidade de PEBD, maior também é o escorrimento. Durante o

ensaio, observou-se que quanto maior a porcentagem de polímero, maior era a quantidade ligante que ficava retido nas paredes do béquer, o que pode não se tratar do escorrimento, mas sim, por uma alteração nas propriedades do ligante que o deixou com uma melhor aderência ao vidro. O ligante que escorre na mistura deveria estar em sua maioria no fundo do béquer, e não aderido às paredes do béquer. Portanto, é necessário avaliar o escorrimento utilizando outro método para que se possa comprovar os resultados.

Conclusões

Tendo em vista os resultados obtidos, a adição de PEBD na mistura asfáltica SMA, mostrou uma tendência a diminuir o Vv. Somente a mistura estudada com 0,5% de PEBD não atendeu o requisito da ET-DE-P00/031 de no máximo 4% de volume de vazios.

No ensaio Cântabro as misturas com incorporação de PEBD não tiveram um bom desempenho em relação a mistura de referência produzida com asfalto borracha. O polímero impôs as misturas uma diminuição das propriedades elásticas, amentando a rigidez das mesmas e diminuindo a capacidade de absorver impactos.

A adição de PEBD na mistura promoveu um aumento na resistência a tração por compressão diametral, confirmando o acréscimo na rigidez da mistura. Em seus estudos com PEBD, Silva (2019) confirma que a adição de PEBD ao ligante asfáltico, faz com que o mesmo tenha uma maior resistência a penetração, deixando o ligante com uma maior rigidez e resistente as deformações permanentes. No entanto, a mesma perde comportamento elástico, reduzindo à resistência a fadiga (recuperações elásticas) das misturas.

No ensaio de mancha de areia observou-se que a mistura de referência foi a que ficou mais fechada, tendo uma classe média de macrotextura. Já as outras misturas com adição de PEBD tiveram sua textura superficial caracterizada como grosseira, mas mesmo assim nenhuma mistura atendeu o requisito da especificação técnica, porém obtiveram uma classe de macrotextura que garante segurança e reduz o risco de hidroplanagem.

No ensaio de escorrimento do ligante notou-se que somente a mistura de referência e a mistura com 0,3% de adição de PEBD atenderam as especificações da ET-DE-P00/031.

Observou-se que quanto maior a adição de PEBD, maior é o escorrimento, tal fato pode ser explicado pela alteração nas propriedades do ligante, onde o mesmo aumenta a sua aderência ao béquer que foi utilizado no ensaio, fazendo com que fique mais material retido.

Portanto, levando em consideração os resultados obtidos, conclui-se que a adição de PEBD no ligante CAP 50/70 usado em mistura asfáltica do tipo SMA, proporciona uma melhoria nas propriedades mecânicas da mesma, como a rigidez, que propicia um aumento na resistência as deformações permanentes e uma diminuição da suscetibilidade térmica das misturas asfálticas.

Recomendações para trabalhos futuros

Controlar a temperatura durante a compactação dos corpos de prova, para as amostras atenderem o mínimo de Vv.

Utilizar outras faixas da ET-DE-P00/031 para produzir misturas asfálticas com adição de PEBD.

Analisar a estabilidade das misturas com adição de PEBD.

Utilizar outros métodos de avaliação ao escorrimento do ligante em misturas tipo SMA.

Referências Bibliográficas

BERNUCCI, L. B.; et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica Para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2006. 504 f

BLASIUS, L. C. B. Escorrimento de misturas asfálticas SMA com uso de lã de vidro como aditivo estabilizante. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma – SC, 2016. Disponível em:

<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/4248/1/Luiz%20Carlos%20Brocca%20Blasius.pdf>.

Acesso em: 7 de abril 2019.

BRINGEL, R. M. Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos. **Análise (UFC)**. Fortaleza – CE, 2007.

CNT – CONFECÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário desempenho do setor, infraestrutura e investimentos**. Brasília – DF, 2017. Disponível em: Acesso em: 15 de março de 2019.

CUNHA, T. M. F.; et al. Efeito da adição de material vegetal (Fibra da castanha de cutia) e polímero (SBS) nas propriedades do ligante asfáltico (CAP 50/70). Universidade Federal do Amazonas – UFAM. AM, 2010.

D’ANTONA, D. M. G.; FROTA, C. A. Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado pelo polímero EVA para pavimentos urbanos de Manaus – AM. **Grupo de geotecnia (UFAM)**. Manaus, v. 21, n. 1, p. 13-18, 2011.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **DER-ET-DE - P00/031. Especificação Técnica: Concreto Asfáltico tipo SMA**. São Paulo, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 054/97: Equivalente de areia**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081/98: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 383/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1999

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084/95: Agregado miúdo - Determinação da densidade real**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 085/94:** Material finamente pulverizado - Determinação da massa específica real. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2010** - ES. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

FILHO, C. L. D. N. (2004). **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PAZINATTO, J. A. M. **Estudo comparativo de misturas asfálticas tipo SMA efetuadas com asfalto modificado por polímero e asfalto modificado por borracha.** (UTFPR). Campo Mourão – PR, 2014.

QUINTANA, H. R.; GÓMEZ, W. F.; LÓPEZ, W. C. Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). **Revista Ingeniería de Construcción**, Colombia, v. 25, n. 1, p.83-94, abr. 2010.

SILVA, K. B. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CPA (camada porosa de atrito) com incorporação de PEBD (polietileno de baixa densidade) no ligante betuminoso.** Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma – SC, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/7137/1/KariniBoneliSilva.pdf>. Acesso em: 5 de agosto 2019.

SILVA, L. S. **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre – RS, 2005.

ZAGONEL, A. R. **Inovações em revestimentos asfálticos utilizados no Brasil.** Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - (UNIJUÍ). Ijuí – RS, 2013.