



Análise da viabilidade técnica do uso de PEBD em mistura asfáltica tipo CPA via método seco

Gabriel Ribeiro Tiscoski (1), Luiz Renato Steiner (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) gabriel_tiscoski@outlook.com, (2) luizsteiner@unescc.net

Resumo: A associação de um material polimérico pode agregar plasticidade a um pavimento asfáltico, tornando mais suscetível a suportar as ações do tráfego e conseqüentemente propor alternativas a construção de malhas rodoviárias e destinação de lixo plástico. A incorporação objeto deste estudo é entre Polietileno de Baixa Densidade e ligante asfáltico convencional CAP 50/70, onde se analisou a compatibilidade entre os componentes e a aplicabilidade ao submeter a realização de uma composição via método seco, de uma Camada Porosa de Atrito, um pavimento drenante executado sobre um rígido e impermeável. Após caracterização dos materiais, foram confeccionadas, via metodologia Marshall, amostras com 3%, 5% e 7% de incorporação de polímero em substituição em peso do ligante, frente a uma referência confeccionada com asfalto borracha. As amostras foram submetidas aos ensaios de permeabilidade, desgaste cântabro e resistência à tração por compressão diametral, no qual se pôde analisar as propriedades físicas e mecânicas alcançadas. Os ensaios mecânicos comprovaram uma alta resistência, alcançando 0,81MPa frente a 0,55MPa segundo especificação normativa, e baixo desgaste superficial das composições com polímero, desgastando 42,62% a menos em relação a composição modificada por 5% de polímero via úmida de Silva (2019), ao passo que o processo de incorporação seco impossibilitou uma permeabilidade mais eficaz, estando 17,20% abaixo da amostra de Silva (2019), pois o polímero bloqueou alguns poros, apesar do volume de vazios ter se adequadado a especificação normativa. Verificando os resultados, constatou-se uma significativa melhora nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica porosa de atrito na faixa granulométrica II, apresentando uma maior coesão entre os agregados, viabilizando o uso de Polietileno de Baixa Densidade em misturas de Camada Porosa de Atrito via método seco.

Palavras-chave: polímero; malhas rodoviárias; camada porosa de atrito.

Technical feasibility analysis of the use of LDPE in PAC asphalt mixture via dry method

Abstract: The association of a polymeric material can add plasticity to an asphalt pavement, making it more susceptible to withstand the actions of traffic and consequently propose

alternatives to the construction of road networks and disposal of plastic waste. The incorporation object of this study is between Low Density Polyethylene and conventional asphalt binder PAC 50/70, where component compatibility and applicability were analyzed by subjecting a dry method composition to a Porous Friction Layer, a draining pavement executed over a rigid and waterproof pavement. After characterization of the materials, samples with 3%, 5% and 7% incorporation of polymer in weight substitution of the binder were made, via Marshall Methodology, against a reference made with rubber asphalt. The samples were subjected to permeability tests, surface wear and tensile strength by diametric compression, in which they can analyze the physical and mechanical properties achieved. Mechanical tests have proven a high resistance, reaching 0,81MPa compared to 0,55MPa according to normative specification, and low surface wear of the polymer compositions, wearing 42,62% less than the 5% polymer modified composition via Silva (2019) wet method, whereas the dry incorporation process made a more effective permeability impossible, 17,20% below Silva (2019) sample, as the polymer blocked some pores, although the void volume was in accordance with the normative specification. Verifying the results, a significant improvement in the mechanical properties of the Porous Friction Layer mixture in the particle size range II was found, showing a greater cohesion between the aggregates, enabling the use of Low Density Polyethylene in Porous Friction Layer mixtures via dry method.

Key-words: polymer; road networks; porous layer of friction.

Introdução

É cada vez mais necessário a vinculação do tema sustentabilidade aos demais campos da sociedade, o que tange a construção e manutenção de malhas rodoviárias não é diferente, pois todo desperdício e retrabalho, tem afetado de modo gradual, as futuras gerações e o desenvolvimento econômico da atual.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte – CNT (2016), só no Brasil, 31.000 km de estradas públicas federais apresentaram algum tipo de deficiência, seja na geometria, sinalização ou pavimento, correspondendo a 57,3%. Isso desencadeia problemas de segurança e conforto ao condutor, além de déficits financeiros e ambientais.

O viés deste trabalho gira em torno do pavimento e como amenizar seu impacto negativo, introduzindo resíduo plástico à mistura betuminosa, matéria prima da camada asfáltica, visando manter boas características mecânicas e diminuir o prejuízo inerente. Além do fato de que a incorporação do polímero ao ligante betuminoso pode resultar em uma mistura mais viscosa a baixas temperaturas, contribuindo para evitar o fendilhamento. Frente a altas temperaturas, pode se apresentar em formato mais rígido, reduzindo assim posteriores

deformações. A mistura pode atingir uma estabilidade vantajosa visando fortalecer a composição, diminuindo assim a espessura do pavimento, melhorando a resistência à abrasão, à fadiga, a oxidação e ao envelhecimento (LEWANDOWSKI, 1994).

A mistura betuminosa tradicional apresenta em sua composição fíller, mistura de agregados pétreos e ligante betuminoso, sendo que a adição do resíduo plástico pode trazer benefícios a vida útil do betume frente à resistência ao fendilhamento, deformação, desagregação e ao envelhecimento. Visto que o Brasil é o quarto maior produtor de lixo plástico no mundo e dentre eles o que menos recicla, correspondendo a 11,3 milhões de toneladas segundo o Fundo Mundial para a Natureza - WWF (2019), a reutilização desses polímeros pode agregar ao setor de construção de malhas rodoviárias brasileiras e minimizar a poluição provocada pelo descarte do lixo plástico.

A mistura entre polímero e ligante pode ocorrer através de dois métodos, sendo por via seca, na qual os polímeros são incorporados na forma de agregados e por via úmida, quando o polímero é adicionado na modificação prévia do betume, sendo este último mais comum, porém para este estudo foi adotado o método por via seca pelo fato de estabelecer um estudo comparativo com o trabalho de Silva (2019), o qual fez uso do método via úmido.

O polímero se trata do Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) presente na confecção de embalagens industriais e agrícolas, brinquedos, utensílios domésticos, filmes termoencolhíveis para paletização de produtos e, principalmente, sacolas de mercado. O PEBD se encontra na classe dos termoplásticos, derivado do petróleo (KUMAR et al, 2011).

O PEBD apresenta uma gama de características próprias, como tenacidade e elevada resistência ao impacto, além de flexibilidade e baixa permeabilidade a água se comparado a outros polímeros. Dentre suas características físicas, destacam-se, densidade entre 0,912 a 0,925 g.cm⁻³, temperatura de fusão entre 102 a 112 °C, resistência à tração de 6,9 a 16Mpa, tração no escoamento de 6,2 a 11,5Mpa e dureza entre 40 a 50 *Shore D*. Devido a sua larga escala de produção, destinação incorreta ao seu posterior uso e capacidade de adaptação do material, o mesmo é visto como uma alternativa a incorporar em misturas betuminosas utilizadas em pavimentos porosos.

Os obstáculos enfrentados pelo polímero estão ligados a compatibilidade entre o betume e o próprio agregado, a capacidade do conjunto de conseguir aumentar a resistência frente a variações de temperatura e de evitar que a mistura possa vir a se separar, seja na fase



de armazenamento, transporte, aplicação ou tempo de serviço. É comumente adicionada a quantidade de polímero entre 2 a 10% do peso (BECKER et al, 2001).

O tipo de mistura CPA é muito empregada em pistas de aeroportos devido ao atrito pneu-pavimento e percolação da água, características provocadas devido à granulometria aberta da mistura, apresentando geralmente entre 18 a 25% de volume de vazios por conta da baixa presença de fíller, agregado miúdo e ligante asfáltico. Essa característica da mistura permite a redução do spray, visto que diminui a película de água formada no pavimento, favorecendo a visibilidade do condutor e mitigando a possibilidade de aquaplanagem. O emprego de CPA em rodovias por vezes não convém, pois pode ocorrer o fechamento de seus poros com o tempo, devido à vibração proveniente dos veículos ou por conta de sujeiras do tráfego, acabando com a funcionalidade de permeabilidade e atrito da mistura. Tais funcionalidades só serão colocadas em prática se a construção da CPA ocorrer sobre uma camada de pavimento rígido e impermeável, o qual irá encaminhar a água das chuvas até as sarjetas.

O fato de ter uma granulometria aberta, apesar de contribuir com a permeabilidade, torna a mistura suscetível à desagregação do pavimento, visto que o ligante pode escorrer pelo esqueleto pétreo fazendo com que o recobrimento dos agregados não seja efetivo, por conta disso a utilização de ligantes modificados por polímero tem sido muito empregado, visando manter a coesão e plasticidade da composição.

Diante o exposto, este trabalho tem como objetivo geral analisar a viabilidade técnica do uso do PEBD em misturas asfálticas do tipo CPA, incorporando o resíduo reciclado do polímero em substituição parcial ao ligante betuminoso na mistura, via método seco.

Materiais e Métodos

Após estudo de referências bibliográficas e embasamento teórico, traçou-se uma linha de trabalho, iniciando pela coleta dos materiais necessários ao estudo em questão, seguida pela caracterização dos mesmos possibilitando, assim, o ajuste a uma das 5 faixas granulométricas previstas na norma DNER-ME 386/99. Em posse de tais dados, e utilizando a metodologia Marshall, foi possível determinar as quantidades dos materiais para amostras de referência e amostras com incorporação do PEBD e submetê-las a execução do primeiro



grupo de corpos de prova, obtendo dessa forma, o teor ótimo do ligante para cada composição. Após isso, foram executados os demais corpos de prova para cada teor de ligante adotado e submetidos aos ensaios para verificação de suas propriedades físicas e mecânicas ao final do processo. As atividades executadas estão dispostas no fluxograma.

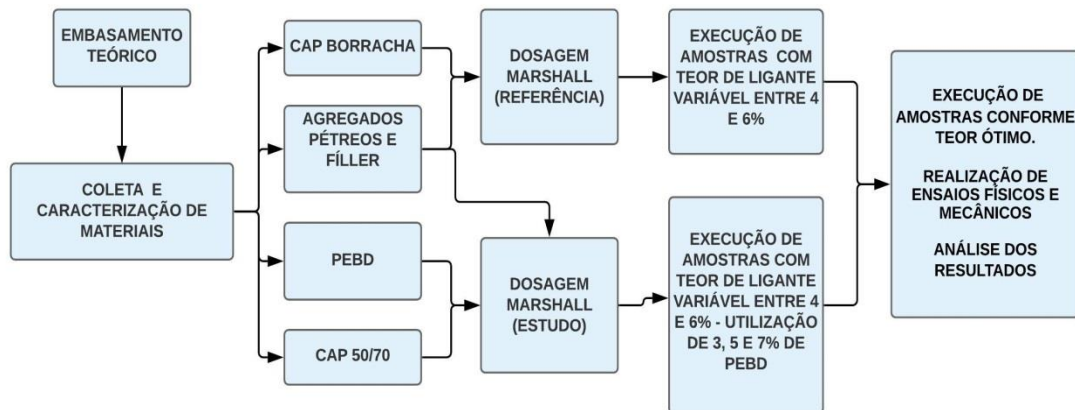


Figura 1. Fluxograma das etapas de trabalho.

Tabela 1. Normas dos ensaios

Ensaio	Norma de execução	Norma de comparação de resultados
Volume de vazios	DNER-ME 117/94	DNER-ME 386/99
Vazios comunicantes	Associação de Rodovias do Japão	-
Permeabilidade	Associação de Rodovias do Japão	ASTM D7064-13
Desgaste Cântabro	DNER-ME 383/99	DNER-ME 386/99
Resistência à tração por compressão diametral	DNIT-ME 136/2010	DNER-ME 386/99

A DNER-ME 386/99 prevê, para misturas tipo CPA, uso de cimento asfáltico modificado por Polímero de Butadieno Estireno (SBS), um elastômero que possui alta resposta elástica e que resiste a deformações permanentes, porém para efeito de estudo foi utilizado o PEBD, como já discriminado. Segundo estudo realizado por Negrão (2016) pode ser utilizado para alterar o ligante, além do SBS, os polímeros Borracha de Butadieno Estireno (SBR), Coluna de Etileno com dois Copolímeros Acooplados (RET) e Copolímero de Etileno Acetato de Vinila (EVA).

Em relação ao ligante, foi adotado o CAP convencional 50/70 para misturas envolvendo o polímero PEBD e o CAP modificado por asfalto-borracha TIREFLEX AB8 utilizado para a mistura de referência. Optou-se por 3 teores de adição de polímero, sendo 3, 5

e 7%, enquanto que os percentuais de ligante foram de 4, 4,5, 5, 5,5 e 6%. O critério adotado na escolha dos percentuais de polímero foi de que é comumente utilizado de 2 a 10% de polímero em ligantes modificados e para comparar com o trabalho de Silva (2019), a qual utilizou os mesmos percentuais. Quanto aos teores de ligante, a norma DNER-ME 386/99 prescreve de 4 a 6% de ligante modificado, sendo que os intervalos de 0,5% entre os teores forneceriam uma boa análise dos resultados.

O polímero PEBD, na forma de resíduo reciclado, foi fornecido por uma empresa situada em Forquilha/SC, a qual trabalha com reciclagem e processamento de sacolas plásticas de mercados, enquanto que os ligantes e agregados pétreos foram obtidos através da empresa SBM – Sul Brasileira de Mineração LTDA, da cidade de Urussanga/SC. O fíller usado foi a cal hidratada tipo CH-1, cedido pelo Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMS), o qual faz parte do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT) da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), situado em Criciúma/SC. A Figura 2 indica os materiais utilizados na confecção das amostras.

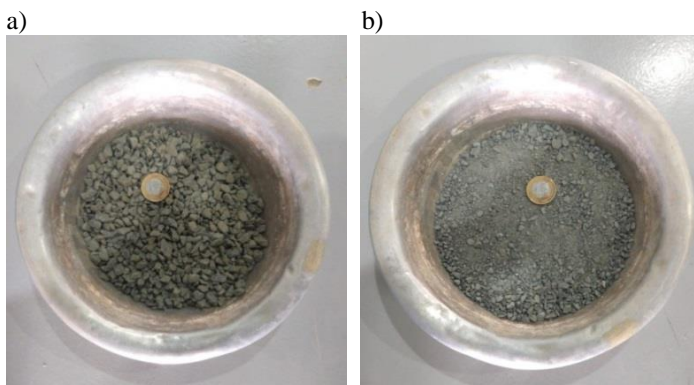


Figura 2. Materiais empregados: (a) Pedrisco, (b) Pó de pedra.

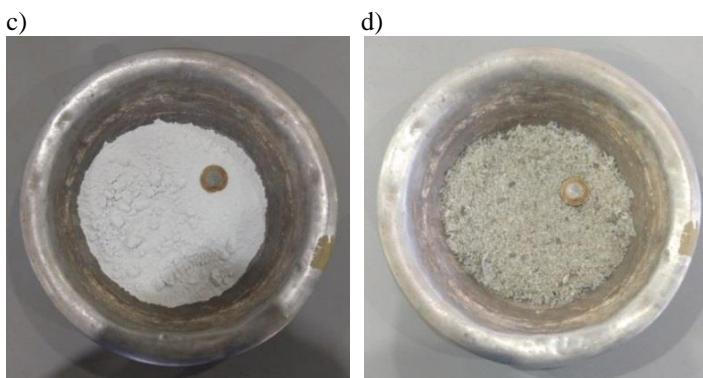


Figura 2. Materiais empregados: (c) Cal hidratada tipo CH-1, (d) Polietileno de Baixa Densidade (PEBD).



A Tabela 2 apresenta a caracterização do CAP 50/70, enquanto que a Tabela 3 fornece a caracterização do asfalto-borracha TYREFLEX AB8.

Tabela 2. 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 3. 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 2 e 3, os ligantes possuem características importantes e distintas, influenciadas pela adição do polímero (borracha) onde, o CAP 50/70 apresenta uma penetração maior, o que indica ser mais mole, ponto de amolecimento menor, indicando ser mais suscetível ao calor e um ponto de fulgor menor, fazendo com que este entre em combustão a uma temperatura de trabalho menor do que em relação ao ligante TYREFLEX AB8.

Após a etapa de embasamento teórico e com acesso ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação foi possível realizar o ensaio granulométrico dos agregados pétreos, pó de pedra e cal, a fim de adequar a faixa granulométrica a uma das 5 prescritas na norma DNER-ME 386/99 e por consequência prosseguir com os demais experimentos. Não houve a

necessidade de obter a granulometria do PEBD visto que o mesmo foi incorporado substituindo em peso o ligante na mistura estudada. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização dos agregados pétreos e fíller

Peneiras		% passante acumulado			Métodos
Malhas	Abertura	Pedrisco	Pó de pedra	CAL CH-1	
1/2"	12,500	100,00	100,00	100,00	DNER-ME 083/98
3/8"	9,500	99,78	100,00	100,00	
#4	4,800	7,89	96,06	100,00	
#10	2,000	0,41	63,65	100,00	
#40	0,420	0,38	34,21	100,00	
#80	0,180	0,36	19,69	98,54	
#200	0,075	0,26	8,04	89,00	
FUNDO	0,000	0,000	0,000	0,00	

A Tabela 5 fornece as faixas granulométricas dispostas na norma DNER-ME 386/99, sendo que após análise foi optado pela faixa II, possibilitando elaborar um comparativo de resultados alcançados em relação ao trabalho de Silva (2019), a qual se diferencia do estudo em questão apenas na forma de incorporação do polímero ao ligante. Silva (2019) abordou o método úmido, consistindo na adição do polímero ao ligante na forma viscosa, enquanto que no método seco o PEBD foi misturado ainda no estado sólido. A configuração da composição granulométrica final da mistura estudada ficou com 77% de pedrisco, 21% de pó de pedra e 2% de fíller.

Tabela 5. Requisitos de dosagem da camada porosa de atrito (Fonte: DNER-ME 386/99, 1999)

Peneiras de malha quadrada		Faixas – Porcentagem em massa, passando					TOLERÂNCIA
ABNT	Abertura (mm)	I	II	III	IV	V	
1/4"	19,00	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,50	100	100	100	100	70-100	±7
3/8"	9,50	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	±7
Nº 4	4,80	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	±5
Nº 10	2,00	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	±5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	±5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	±3
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	±2

Definida a faixa granulométrica, foi dado início a execução das primeiras amostras com o intuito de obter o teor ótimo respectivo a cada uma das 4 composições estudadas. O corpo de prova de referência foi composto por agregados pétreos, filler e ligante TYREFLEX AB8, enquanto que as amostras objeto do estudo contaram com alteração de ligante, utilizando o CAP 50/70, além da substituição em peso do ligante por PEBD, alternando entre 3, 5 e 7% de presença do polímero. O teor de ligante utilizado variou 0,5% entre 4 e 6%. O teor ótimo de cada composição foi obtido por meio da determinação do volume de vazios, conforme prescrito na norma DNER-ME 117/94, sendo que na etapa de pesagem do corpo imerso em água e envolto em parafina houve substituição por filme PVC sem alteração da legitimidade do ensaio. Após, foram calculados os vazios comunicantes, seguindo a Associação de Rodovias do Japão (1996, *apud* Oliveira, 2003), a fim de verificar o percentual de poros conectados que de fato contribuem para a percolação da água.

A segunda etapa de confecção de corpos de prova teve seu início com foco centralizado nos teores de ligante adotados, levando a execução de 36 amostras, sendo 9 para cada uma das 4 composições e distribuídas igualmente entre 3 ensaios, resistência à tração por compressão diametral, desgaste Cântabro e permeabilidade.

A construção das amostras ocorreu seguindo processo descrito na norma DNER-ME 043/95. A Figura 3 apresenta o método de incorporação do PEBD, onde se adiciona o polímero na forma de agregado, porém sem granulometria específica.

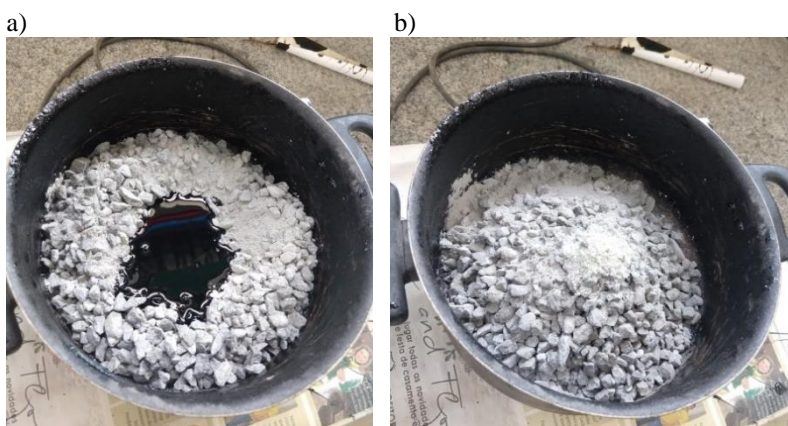


Figura 3. Preparação das amostras: (a) Agregado pétreo, filler e CAP 50/70, (b) Acréscimo de PEBD via método seco.

Por se tratar de uma camada de revestimento de granulometria aberta e com intuito principal um bom escoamento da água através do pavimento, foram realizados os ensaios de permeabilidade horizontal e vertical, a fim de atestar o quão eficaz é a composição nesse quesito. Utilizando um aparelho semelhante ao de TAKAHASHI E PARTL (1999, *apud* Oliveira, 2003) e confeccionado no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação foi possível averiguar as condições de percolação das composições.

A execução dos ensaios de permeabilidade horizontal e vertical seguiram os procedimentos indicados pela Associação de Rodovias do Japão (1996, *apud* Oliveira, 2003), indicados na Figura 4.

Ambos os ensaios objetivam a determinação do coeficiente de permeabilidade, seguindo a Eq. 1. Através da Eq. 2 foi possível encontrar a permeabilidade equivalente, correlacionando as outras duas citadas anteriormente. É desejável que a permeabilidade vertical seja sempre inferior a horizontal para que não acumule água no interior da amostra.

$$k = 2,3 \times \frac{aL}{At} \times \left[\log \frac{h_0}{h_1} \right] \quad (1)$$

onde:

k = Permeabilidade (cm s⁻¹)

a = Área da seção transversal do tubo (cm²)

L = Altura da amostra (cm)

A = Área da seção transversal da amostra (cm²)

t = Tempo de fluxo dentre as duas marcas (s)

h₀ = Altura da água na marca superior do tubo transparente (cm)

h₁ = Altura da água na marca inferior do tubo transparente (cm)

$$k_e = \sqrt{(k_v * k_h)} \quad (2)$$

onde:

k_e = Permeabilidade equivalente (cm s⁻¹)

k_v = Permeabilidade vertical (cm s⁻¹)

k_h = Permeabilidade horizontal (cm s⁻¹)



Figura 4. Realização de ensaios: (a) Permeabilidade horizontal, (b) Permeabilidade vertical.

O ensaio desgaste Cântabro, regido pela DNER-ME 383/99, visa aferir a coesão aparente da mistura elaborada, por meio do arrancamento dos agregados na faixa de rolamento, devido ao constante atrito pneu-pavimento, portanto, o ensaio mede a tendência que a estrutura tem de resistir a esse contato. Os resultados são conhecidos pela Eq. 3:

$$D = \left[\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right] \times 100 \quad (3)$$

onde:

D = valor do desgaste, em %;

M1 = massa do corpo de prova antes do ensaio;

M2 = massa do corpo de prova após o ensaio.

O ensaio prevê, para misturas asfálticas porosas, um desgaste máximo admissível de 25% (DNER-ME 383/99, 1999).

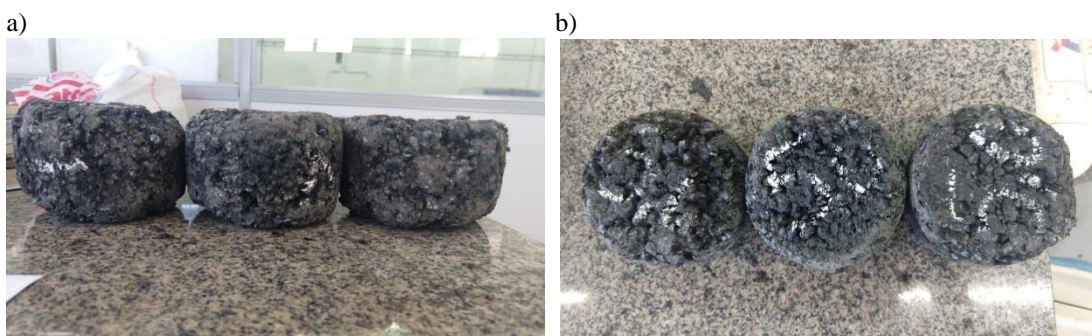


Figura 5. Corpos de prova submetidos ao ensaio desgaste Cântabro: (a) Amostras pós-ensaio, vista frontal; (b) Amostras pós-ensaio, vista superior.

Observadas as prescrições da norma DNIT 136/2010 – ME, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral proporciona a resistência à tração suportada pelo corpo de prova. A resistência é conhecida através da equação 4:

$$\sigma R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (4)$$

onde:

σR = Resistência à tração, em Mpa

F = carga de ruptura, em N

D = Diâmetro do corpo de prova, em cm

H = Altura do corpo de prova, em cm

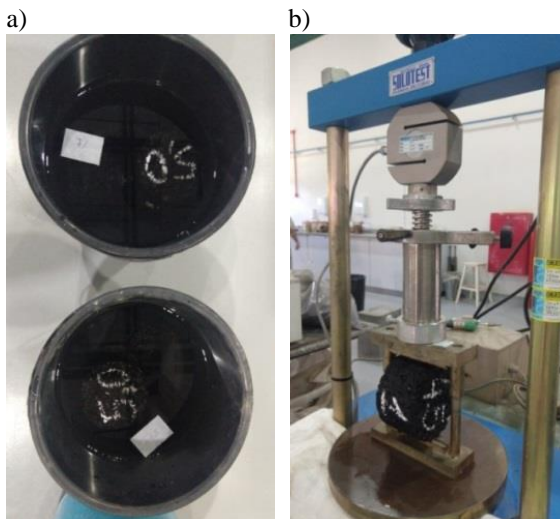


Figura 6. Preparação para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) amostras submersas; (b) amostra submetida à carga.

Resultados e discussões

Para determinação da densidade aparente das amostras foi adotado o procedimento previsto na norma DNER-ME 117/94. Com esses dados foi possível encontrar o volume de vazios, através da metodologia Marshall. Enquanto que o volume de vazios comunicantes foi calculado conforme proposto pela Associação de Rodovias do Japão (1996, *apud* Oliveira, 2003).

Tabela 6. Volume de vazios X Teor de ligante

Composição	Teor de ligante (%)	Densidade aparente (g cm ⁻³)	Volume de vazios (%)	Vazios comunicantes (%)
REF.	4,0	2,08	26,47	-
	4,5	2,09	25,53	-
	5,0	2,10	24,49	10,27
	5,5	2,13	22,72	-
	6,0	2,13	21,80	-
3% PEBD	4,0	2,17	23,25	-
	4,5	2,21	21,03	6,16
	5,0	2,24	19,26	-
	5,5	2,27	17,50	-
	6,0	2,23	18,20	-
5% PEBD	4,0	2,17	23,34	-
	4,5	2,18	22,11	-
	5,0	2,20	20,70	7,71
	5,5	2,18	20,69	-
	6,0	2,20	19,27	-
7% PEBD	4,0	2,12	24,91	-
	4,5	2,14	23,61	-
	5,0	2,17	21,91	7,52
	5,5	2,15	21,80	-
	6,0	2,17	20,54	-
Especificação DNER-ME 386/99			18 - 25	

Tabela 7. Volume de vazios X Vazios comunicantes

Composição	Volume de vazios (%)		Vazios comunicantes (%)	
	AUTOR (2019)	SILVA (2019)	AUTOR (2019)	SILVA (2019)
REF.	24,49	24,80	10,27	15,66
3% PEBD	21,03	23,60	6,16	11,42
5% PEBD	20,70	25,70	7,71	11,83
7% PEBD	21,91	29,90	7,52	13,72

Para a escolha do teor ótimo de ligante das misturas estudadas, foi adotado o critério do percentual médio para o tipo de mistura e que apresentassem semelhanças no volume de vazios dentro das especificações da norma DNER-ME 386/99, que prevê um volume de vazios entre 18 e 25% para CPA. Assim, os teores de ligante escolhidos foram de 5% para as misturas REF, 5% PEBD e 7% PEBD, para amostra 3% PEBD foi adotado o percentual de 4,5%. A amostra 5% PEBD foi que apresentou o menor volume de vazios em relação a amostra de referência, sendo 15,48% inferior. Para o mesmo teor de CAP em relação a Silva (2019), esta apresentou uma redução ainda maior, entorno de 19,46%. As demais misturas, apesar de apresentarem volumes de vazios (Vv) superiores à amostra com 5% PEBD, tiveram

um comportamento semelhante, tendo seus volumes de vazios inferiores a amostra de referência e em relação a Silva (2019). Com relação aos vazios comunicantes (V_{vc}), a amostra 3% PEBD foi a que obteve o menor desempenho, sendo 40,02% inferior à amostra REF e 46,06% em relação ao mesmo percentual de Silva (2019). As demais misturas tiveram comportamento semelhante frente ao V_{vc} , ou seja, sendo inferiores a amostra REF e mais sensíveis ainda, se comparados aos resultados de Silva (2019), para os mesmos percentuais. Isso mostra que as misturas realizadas via método seco de incorporação do PEBD, tendem a ter seu esqueleto pétreo mais fechado e isso pode ter ocorrido devido ao fato de que o resíduo favoreceu o fechamento dos vazios, mostrando que o mesmo não foi totalmente dissolvido e incorporado ao ligante asfáltico, durante o processo de mistura das composições estudadas, tendo um comportamento na mistura de agregado miúdo.

O procedimento adotado para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral se deu pelo método DNIT-ME 136/2010. Enquanto que o ensaio desgaste cântabro seguiu a metodologia proposta pela norma DNER-ME 383/99.

Tabela 8. Resultados dos ensaios mecânicos: desgaste cântabro e resistência à tração por compressão diametral

Composições	Teor de ligante (%)	Desgaste Cântabro (%)		Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	
		AUTOR (2019)	SILVA (2019)	AUTOR (2019)	SILVA (2019)
REF.	5,0	8,63	22,36	0,56	0,24
3% PEBD	4,5	10,96	19,61	0,72	0,27
5% PEBD	5,0	11,96	16,26	0,80	0,31
7% PEBD	5,0	9,33	17,83	0,81	0,17
Especificação DNER-ME 386/99		< 25,00		> 0,55	

Comparando com os valores especificados pela norma DNER-ME 386/99, todas as composições se adequaram aos limites estipulados, tanto no ensaio desgaste Cântabro quanto na resistência à tração por compressão diametral. Dentre as misturas estudadas, a que obteve o menor desempenho no ensaio de Cântabro foi a amostra 5% PEBD, sendo superior na perda de massa em 38,59% em relação à amostra REF, mas sendo inferior 109,03%, em relação as especificações normativas. Em relação às amostras de Silva (2019), todas as misturas estudadas obtiveram resultados superiores, ou seja, as amostras deste estudo apresentaram menores perdas de massa, tendo as misturas de referência as maiores discrepâncias e sendo a

de Silva (2019) superior em 159,10%, indicando uma maior fragilidade da estrutura em termos de coesão da mistura se comparada com as deste estudo. Como pode ser observado, a incorporação via seco do resíduo reciclado de PEBD ao ligante asfáltico impôs nas misturas deste estudo uma maior resistência ao arrancamento dos agregados em relação às misturas estudadas por Silva (2019), podendo estar relacionado a uma maior coesão e densidade das misturas promovida pelo PEBD incorporado.

Com relação aos resultados de resistência à tração por compressão diametral, as amostras apresentaram uma melhora progressiva, conforme aumenta a introdução do resíduo reciclado do polímero de baixa densidade nas misturas, tendo como ponto alto a composição 7% PEBD, resistindo a 0,81MPa, superior em 47,27% ao estipulado pela norma de 0,55MPa. Em relação à maior resistência alcançada por Silva (2019) para a amostra de 5% PEBD a diferença foi de 161,29%, ou seja, as misturas obtidas por via seca apresentam valores muito superiores em relação às obtidas por via úmida. Pôde-se verificar que a menor incidência de vazios somado ao fato do PEBD aumentar a viscosidade do ligante na mistura possibilitou uma composição mais coesa, portanto, mais resistente e capaz de suportar cargas maiores do tráfego.

A Tabela 9 mostra os valores obtidos nos ensaios de permeabilidade horizontal e vertical das misturas deste estudo e as obtidas por Silva (2019).

Tabela 9. Resultados dos ensaios de permeabilidade horizontal e vertical

Composições	Permeabilidade Horizontal (cm.s-1)		Permeabilidade Vertical (cm.s-1)		Permeabilidade Equivalente (cm.s-1)	
	AUTOR (2019)	SILVA (2019)	AUTOR (2019)	SILVA (2019)	AUTOR (2019)	SILVA (2019)
REF.	0,101	0,327	0,041	0,245	0,064	0,283
3% PEBD	0,172	0,258	0,050	0,137	0,093	0,188
5% PEBD	0,270	0,235	0,063	0,105	0,130	0,157
7% PEBD	0,250	0,354	0,047	0,199	0,108	0,265
Especificação ASTM D7064-13 (2013, <i>apud</i> Jacques, 2018)					> 0,116	

Segundo a norma ASTM D7064-13 (2013, *apud* Jacques, 2018), esta recomenda que as misturas asfálticas do tipo CPA devem apresentar, no mínimo, 0,116 cm.s⁻¹ para permeabilidade equivalente, onde apenas a composição 5% PEBD se adequou a essa especificação, diferentemente dos resultados de Silva (2019), aos quais todos foram

superiores ao coeficiente de permeabilidade mínimo. Em relação à referência, a mistura 5% PEBD teve sua permeabilidade equivalente superior em 103,13%, já na comparação com 5% PEBD de Silva (2019), esta foi 17,20% inferior, mostrando que as misturas estudadas ficaram com seu esqueleto pétreo mais fechado, diminuindo a capacidade de percolação da água em seu interior, tanto na vertical quanto na horizontal. Apesar dos valores de permeabilidade alcançados por Silva (2019) terem sido superiores as misturas deste estudo, a incorporação do PEBD via método seco permitiu que a misturas continuassem com as características de camada drenante, sendo a permeabilidade vertical sempre inferior a horizontal, mesmo sendo a equivalente inferior 19,83% para a mistura 3% PEBD em relação à especificação. Os resultados de permeabilidade comprovam que, além da pequena variabilidade da granulometria entre as misturas estudadas por Silva (2019) e as deste estudo, o resíduo de PEBD incorporado via método seco ao ligante asfáltico, promove uma maior densidade nas misturas, fechando os vazios comunicantes e tendo como provável causa, a baixa eficiência nos processos de mistura aliada a diminuição da temperatura no processo, fazendo com que o PEBD não seja totalmente dissolvido e incorporado ao ligante, funcionando parcialmente como agregado miúdo ou filler na mistura, alterando a granulometria do esqueleto pétreo.

Conclusão

O intuito deste estudo foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas de uma mistura tipo CPA, composta por cimento asfáltico de petróleo convencional, o CAP 50/70, e resíduo de sacolas plásticas, com foco na incorporação do polímero ao ligante via método seco, sendo menos convencional que o método úmido. Para análise de aplicabilidade foram comparados os resultados a composição que utilizou o ligante TYREFLEX AB8, o qual é modificado por borracha, a especificação normativa e o estudo de Silva (2019).

No quesito volume de vazios, as composições com PEBD apresentaram uma granulometria mais fechada em relação à amostragem referencial e aos resultados de Silva (2019), indicando que o plástico não tenha se dissolvido por completo e por consequência, fechando alguns poros. Apesar disso, todos os resultados obtidos pelos corpos de prova com PEBD se enquadraram na determinação do DNER-ME 386/99, entre 18 e 25% de volume de vazios.

Quanto à permeabilidade equivalente, a incorporação via método seco inviabilizou parcialmente a percolação da água, não descaracterizando as misturas estudadas com PEBD como camada drenante, sendo que apenas a composição com 5% de PEBD se mostrou acima da especificação normativa, porém todas as demais obtiveram valores inferiores tanto a norma quanto ao trabalho de Silva (2019). A baixa efetividade dos poros representados no ensaio de vazios comunicantes é um demonstrativo da dificuldade da água percolar o pavimento.

Em contrapartida, a resistência à tração por compressão diametral apresentou valores muito superiores à norma DNER-ME 386/99 e a referência, mas principalmente aos resultados de Silva (2019), destacando que a amostra 7% PEBD obteve a maior resistência, justamente devido o fato de o polímero melhorar a viscosidade da composição, deixando mais coesa e menos suscetível a vazios, o que a tornou mais compacta e reforçou seu esqueleto pétreo.

A menor incidência de vazios e conseqüentemente uma composição mais compacta justificam os bons resultados no ensaio desgaste cântabro, sendo que todas as composições apresentaram desgaste inferior a 25%, especificado pela norma DNER-ME 386/99, além de desgastarem menos que as composições de Silva (2019). Neste ensaio a amostragem referencial se mostrou mais resistente ao arrancamento do agregado graúdo e a desintegração superficial do revestimento em relação às amostras com PEBD.

Após análise dos resultados, pode-se concluir que a associação entre CAP 50/70 e PEBD via método seco promove uma melhora notável nos quesitos resistência à tração, coesão e baixo desgaste, porém restringe a percolação da água, influenciando negativamente os resultados de permeabilidade. Em localidades onde há baixa incidência pluviométrica a composição estudada poderia ser empregada.

Recomendações para trabalhos futuros

Atestar a associação entre ligante asfáltico e PEBD, via mistura a seco, em outros tipos de misturas que não necessitem apresentar característica drenante.

Analisar a resistência e o desgaste de uma mistura CPA com percentuais de PEBD superiores a 7% incorporado ao ligante via mistura a seco.

Analisar a resistência e o desgaste de uma mistura CPA com ligante modificado com PEBD via mistura a seco em diferentes faixas granulométricas.

Incorporar outros tipos de resíduos poliméricos recicláveis e não recicláveis em misturas do tipo CPA.

Referências bibliográficas

BECKER, Y.; MÉNDEZ, M. P.; RODRÍGUEZ, Y. **Polymer modified asphalt**. Venezuela, v. 9, n 1, p. 1-12, 2001.

BERNUCCI, Liedi Barian (Et al.). **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, 2008, p. 8-185.

BOLSONI, E. **Estudo da reprocessabilidade do polietileno de baixa densidade**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2001.

CARARO, F. Z. **Influência da granulometria na permeabilidade de mistura asfálticas CPA**. 2016. 20 f. Artigo (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte Rodoviário - Desempenho do Setor, Infraestrutura e Investimentos**. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/transporte-rodoviario-desempenho-infraestrutura-investimentos>. Acesso em: 15 abr. 2019.

COSTA, P. L. **Estudo da Compactabilidade em Laboratório de Misturas Betuminosas com Resíduos Plásticos**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Área Departamental de Engenharia Civil, Mestrado em Especialização de Comunicação e Transportes, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2015.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. de. Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. Rio de Janeiro, 2003. p. 1-13.

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 117/94: Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

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 386/99:** Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2004 – ES:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2004.

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

FUNDO MUNDIAL PARA A NATUREZA. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico.** Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 19 abr. 2019.

JACQUES, G. E. **Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA).** 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

KUMAR, A. P.; SINGH R. P.; SARWADE B. D. **Degradability of composites, prepared from ethylene-propylene copolymer and jute fiber under accelerated aging and biotic environments.** Mater. Chem. Phys. 92(2005) 458-469.

LEWANDOWSKI, L. H. **Polymer Modification of Paving Asphalt Binders, Rubber Chemistry and Technology.** 67 (1994) 447-480.

NEGRÃO, D. P. **Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicação em pavimentos.** 2006. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, C. G. M. **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante.** 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2003.

SCHNEIDER, D. **Determinação do teor de asfalto para enquadramento de uma mistura asfáltica aberta como camada porosa de atrito.** 2016. 78 f. Artigo (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2016.

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.** 2019. 19 f. Artigo (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

WIJNAND, W. D.; HAMILTON, A; SCHEER, R.; STAKES, T; ALLAN, S. **Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização.** WWF, Gland. Março. 2019.