

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.

Karini Boneli Silva (1), Luiz Renato Steiner (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) ka_boneli@hotmail.com, (2) luizsteiner@unesc.net

Resumo: A incorporação de polímeros nas misturas asfálticas pode ser uma alternativa técnica viável para melhorar as propriedades mecânicas do pavimento. Esta adição tem como finalidade proporcionar menor desgaste e diminuir a deformação permanente, consequentemente aumentar a vida útil de revestimentos asfálticos. O presente trabalho teve como objetivo de estudo a incorporação de polímeros reciclados no ligante asfáltico e avaliar as propriedades dele nas misturas asfálticas porosas. O polímero utilizado foi o polietileno de baixa densidade (PEBD). As adições foram realizadas via processo úmido nas proporções de 3, 5 e 7% de PEBD em peso do ligante asfáltico CAP 50/70. Por meio dos ensaios de caracterização dos agregados e do ligante asfáltico com PEBD, foram feitas as dosagens das misturas asfálticas pelo método Marshall e a confecção dos corpos de prova, possibilitando a realização dos ensaios de volume de vazios, volume de vazios comunicantes, permeabilidade, cântabro e resistência a tração por compressão diametral. As misturas asfálticas com asfalto modificado por borracha foram tomadas como referência, tendo em vista a utilização desse ligante em misturas porosas. Pelos resultados obtidos, destaca-se o ensaio cântabro, ocorreu um decréscimo na perda de massa, consequentemente maior coesão dos agregados na mistura, resultando em menor desagregação do pavimento, também obteve-se maior resistência a tração por compressão diametral. Considerando os resultados obtidos, verificou-se que ocorreu uma melhora nas misturas asfálticas do tipo CPA na faixa II, provocando uma elevação na coesão do esqueleto pétreo e da adesividade, indicando a viabilidade da incorporação de PEBD no ligante asfáltico.

Palavras-chave: misturas asfálticas porosas; polímero; pavimento.

Introdução

O transporte rodoviário brasileiro enfrenta graves problemas com a baixa qualidade da infraestrutura do país, apenas 12,4% da malha rodoviária é pavimentada. No período de 2009

a 2017, a frota de veículos aumentou 63,6%, chegando a quase 100 milhões de veículos em circulação (CNT, 2018).

De acordo com a pesquisa realizada em 2017 pela CNT (Confederação Nacional de Transportes), a respeito das condições das rodovias brasileiras, foram avaliados 49,57% das rodovias referente a seu estado de pavimento, de sinalização e de geometria das vias. Entre as rodovias avaliadas, 40,3% estão em estado ótimo de pavimento, 9,7% como estado bom e 50% entre regular a péssimo.

No Brasil, grande parte do transporte de pessoas e mercadorias é feito por meio de rodovias. Segundo a CNT (2018), mais de 60% das mercadorias e 90% dos passageiros são transportados por rodovias. Para Queiroz (2016), considerando a importância do transporte rodoviário para o país, é importante a concepção de pavimentos que de fato conserve a sua vida útil de projeto e que proporcionem aos seus usuários conforto e segurança.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), os asfaltos convencionais possuem bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários pra o desempenho das misturas asfálticas. No entanto, com o crescente aumento da frota de veículos, dos excessos de carga máxima por eixo e condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas, é necessário estudar alternativas que possam modificar as propriedades dos asfaltos.

Segundo Oliveira (2003), a aplicação de misturas asfálticas drenantes tem sido utilizada devido às vantagens oferecidas no aspecto de segurança e conforto, em relação aos tradicionais revestimentos betuminosos. A principal característica de uma CPA (camada porosa de atrito) é possuir uma composição granulométrica aberta, proporcionando uma mistura com elevado volume de vazios (Vv). De acordo com Queiroz (2016), onde há uma maior exigência em relação ao tráfego em pista molhada, são adotados os revestimentos porosos pela sua alta capacidade de drenagem, especialmente em pavimentos aeroportuários.

De acordo com Buddhavarapu, Smit e Prozzi (2015, *apud* Queiroz, 2016), os revestimentos porosos apresentam um custo por tonelada de 20 a 50% superior em relação as misturas asfálticas densas convencionais, devido ao fato de nesse tipo de revestimento ser recomendado a utilização de ligantes asfálticos modificados por polímeros.

A modificação dos asfaltos é um processo frequentemente usado para melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Atualmente, uma das alternativas estudadas é o uso de polímeros de vários tipos que melhoram o desempenho do ligante. Para Yildirim (2007), os asfaltos modificados com polímeros apresentam melhor resistência à deformação permanente e ao trincamento térmico.

Segundo Bernucci *et al.*, (2008), para que a modificação do ligante seja tecnicamente e economicamente viável, é necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização de forma que se misture adequadamente com o asfalto. Consiga melhorar as características de fluidez do asfalto a altas temperaturas e o ligante não poderá ficar muito viscoso para a mistura, nem tão rígido ou quebradiço em baixas temperaturas.

Negrão (2006) menciona os polímeros mais utilizados na modificação de CAP (concreto asfáltico de petróleo) para fins de pavimentação no Brasil são: SBS (copolímero de estireno butadieno), SBR (Borracha de butadieno estireno), EVA (Copolímero de etileno acetato de vinila) e o RET (Coluna de etileno com dois copolímeros acoplados). Entre os polímeros mais utilizados citados por Negrão (2006), outros materiais plásticos estão muitos presentes na vida cotidiana e seu uso tem aumentado, dentre eles está o PEBD (polietileno de baixa densidade) muito encontrado em sacolas plásticas.

Segundo a pesquisa anual industrial do IBGE em 2016 foram produzidos 951.610 toneladas de PEBD, o equivalente a 10,66% da fabricação de resinas termoplásticas no Brasil. Foi vendido aproximadamente 72% da produção do mesmo ano. Porém, a adição de PEBD na mistura asfáltica ainda não foi muito estudada. Para dar um uso alternativo ao PEBD esse trabalho visa estudar a viabilidade da incorporação no ligante asfáltico convencional para uso em misturas asfálticas porosas, visando uma alternativa econômica de pavimentação.

Para Arao (2016), a reutilização de resíduos sólidos minimiza os impactos ambientais e também diminui a quantidade de matéria prima utilizada. A inclusão de materiais alternativos na pavimentação pode baixar o custo de produção e melhorar as propriedades mecânicas, estimulando cada vez mais pesquisas nestes materiais.

Materiais e Métodos

Este trabalho divide-se em quatro etapas, sendo que a primeira delas teve início com um estudo bibliográfico. Em seguida fez-se a coleta, secagem, ensaio de composição granulométrica e ensaios de caracterização física dos agregados pétreos, filler, e resíduo de PEBD. A terceira etapa consistiu na definição do traço referência e seus respectivos percentuais de incorporação de PEBD em relação ao peso do ligante. Na quarta etapa realizaram-se ensaios de caracterização física do ligante com incorporação de PEBD e ensaios de caracterização mecânica e física das misturas asfálticas do tipo CPA faixa II, juntamente

com a análise dos resultados e conclusões. A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas do trabalho.

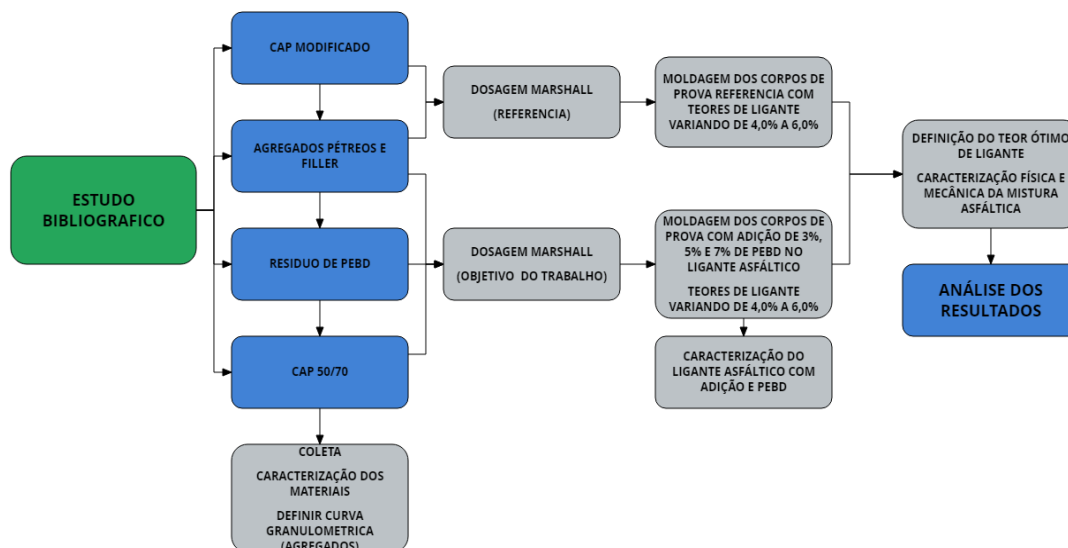


Figura 1. Fluxograma das etapas do trabalho

Os materiais utilizados na pesquisa foram: agregados pétreos, filler, cimento asfáltico de petróleo (CAP) convencional e modificado por polímero e resíduo de PEBD. Os agregados foram fornecidos pela empresa SBM – Sul Brasileira de Mineração LTDA, que explora uma jazida no município de Urussanga – SC. Foram utilizados dois tipos de agregados, que são comercialmente chamados de Pedrisco e Pó de pedra conforme a Figura 2, as amostras foram secas em estufa por aproximadamente 24 h a 180 °C.

O filler utilizado no trabalho foi a cal hidratada do tipo CH-1 conforme a Figura 2, 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.

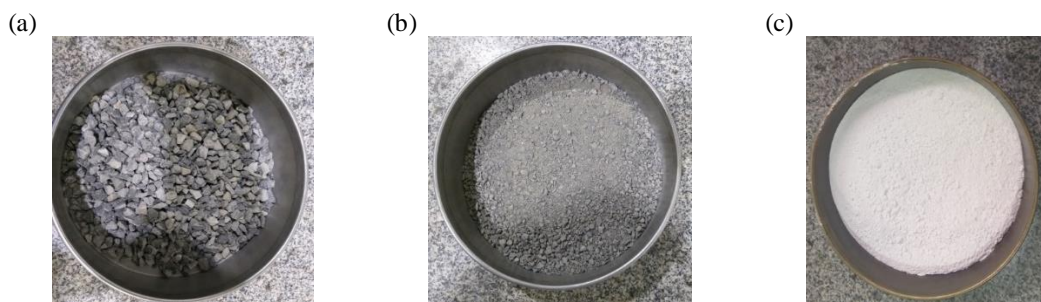


Figura 2. Agregados pétreos e filler utilizados no trabalho: (a) Pedrisco, (b) Pó de Pedra, (c) Cal hidratada (CH-1)

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física necessários para a aceitação do uso dos agregados e filler na mistura.

Tabela 1. 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 |

Os ligantes asfálticos utilizados foram do tipo asfalto-borracha, TIREFLEX AB8 para confeccionar os corpos de prova referência e o cimento asfáltico de petróleo tipo CAP 50/70 como base para a incorporação de PEBD. Fornecidos pela SBM – Sul Brasileira de Mineração LTDA proveniente da refinaria da CBB ASFALTOS, em Curitiba/PR. As propriedades físicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Ensaio de caracterização dos ligantes (Fonte: CCB ASFALTOS, 2018)

| Especificação do CAP 50/70. | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|---------------|------------|-----------|--|
| Ensaio | Unidades | Especificação | Resultados | Métodos | |
| Penetração (100g, 5s, 25C) | 0,1 mm | 50 a 70 | 52 | NBR 6576 | |
| Ponto de amolecimento, mín. | °C | 46 | 50,2 | NBR6560 | |
| Viscosidade Brookfield 135 | | > 274 | 330 | | |
| Viscosidade Brookfield 150 | cp | > 112 | 168 | NBR 15184 | |
| Viscosidade Brookfield 177 | | 57-285 | 62 | | |
| Ponto de Fulgor | oC | > 235 | >236 | NBR 11341 | |
| Índice de Susceptibilidade Térmica | - | -2,2 | -1,1 | - | |
| Ductilidade a 25C, 5 cm/min | cm | > 60 | >145 | NBR 6293 | |
| Solubilidade em Tricloroetileno | % (Massa) | > 99,5 | 100 | NBR 14855 | |
| Massa Específica a 25 | Kg m ⁻¹ | - | 1,005 | NBR 6296 | |
| Especificação do TYREFLEX AB8. | | | | | |
| Características | Unidades | Especificação | Resultados | Métodos | |
| Penetração (100g, 5s, 25oC) | 0,1 mm | 30 a 70 | 51 | NBR 6576 | |
| Ponto de amolecimento, mín. | oC | > 50 | 55,4 | NBR6560 | |
| Recuperação elástica, 10 cm, 25oC | % | > 50 | 58 | NBR 15086 | |
| Viscosidade Brookfield | 1450 | 800-2000 | 1445 | NBR 15529 | |
| Ponto de Fulgor | oC | > 235 | 269 | NBR 11341 | |
| Ensaio de separação de Fase | Δ P.A. (oC) | < 9 | 3,8 | NBR 15166 | |
| Massa Específica a 25oC | Kg m ³ | - | 1,024 | NBR 6296 | |

O polímero utilizado foi o PEBD, conforme Figura 3 são apresentados o (a) resíduo utilizado e sua (b) granulometria, obtido por meio de trituração de sacolas plásticas diversas. As amostras de PEBD granulado foram fornecidas por uma empresa localizada no município

de Forquilha/SC, que recicla esse material e após ser processado, transformando-o em matéria prima para empresas de injeção de plástico.

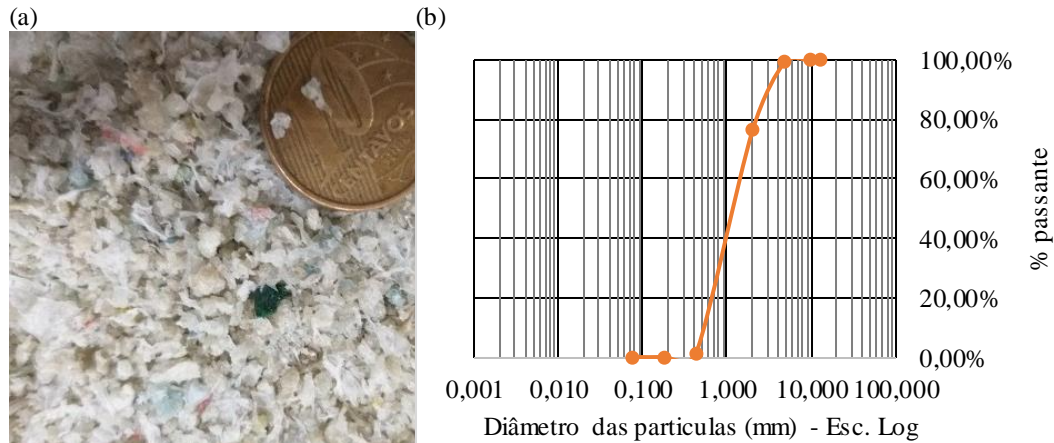


Figura 3. (a) Resíduo de PEBD (Polímero de baixa densidade), (b) Curva granulométrica PEBD

Foram feitas incorporações de 3, 5 e 7% de PEBD na substituição em peso da massa do ligante CAP 50/70 pelo processo de via úmida. A mistura foi feita em recipiente, onde a temperatura de mistura foi de 175 °C. A homogeneização foi realizada primeiramente por meio de agitação manual com uma espátula. Porém no momento da preparação para a moldagem dos corpos de prova, verificou-se a separação de fase entre o polímero e ligante. Em vista disso foi realizada novamente a mistura com misturador mecânico a 175 °C, logo após obteve-se um material de característica visualmente mais homogêneo para a realização das misturas.

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMS), do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

Com a finalidade de realizar o estudo comparativo dos ligantes asfalto-borracha TIREFLEX AB8 e o CAP 50/70 com incorporação de PEBD, foram realizados ensaios de penetração seguindo as especificações da DNIT 155/2010 e os ensaios de adesividade do ligante ao agregado seguindo a DNER-ME 078/94.

A análise granulométrica apresentada na Tabela 3 foi realizada conforme a norma DNER ME 083/98. A Tabela 4 apresenta as faixas granulométricas aceitáveis pelo DNIT para projeto de misturas do tipo CPA. A granulometria do pó de pedra disponível para o trabalho apresentou uma carência de materiais finos, para suprir essa ausência, adicionou-se cal hidratada do tipo CH-1 para facilitar o enquadramento do material na composição da mistura.

Tabela 3. Granulometria e características físicas dos agregados e filler

| Peneiras | | % passante acumulado | | | Método |
|----------|---------------|----------------------|-------------|----------|----------------|
| Malha | Abertura (mm) | 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 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| #4 | 4,800 | 32,92 | 97,58 | 100,00 | |
| #10 | 2,000 | 5,00 | 61,41 | 100,00 | |
| #40 | 0,420 | 2,28 | 28,86 | 100,00 | |
| #80 | 0,180 | 1,81 | 17,14 | 98,36 | |
| #200 | 0,075 | 0,92 | 6,67 | 89,27 | |
| FUNDO | 0,000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |

Tabela 4. Faixas granulométricas camada porosa de atrito (Fonte: Norma DNER-ES 386/99)

| Peneira de malha quadrada | | % em massa, passando | | | | | Tolerâncias |
|--|---------------|----------------------|-----------|-------|-------|--------|-------------|
| Série ASTM | Abertura (mm) | I | II | II | IV | V | |
| 3/4" | 19,0 | - | - | - | - | 100 | ±7% |
| 1/2" | 12,5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 70-100 | ±7% |
| 3/8" | 9,5 | 80-100 | 70-100 | 80-90 | 70-90 | 50-80 | ±7% |
| Nº 4 | 4,8 | 20-40 | 20-40 | 40-50 | 15-30 | 18-30 | ±5% |
| Nº 10 | 2,0 | 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% |
| Ligante polimerizado solúvel no tricloroetileno, % | | | 4,0 – 6,0 | | | | ±0,3% |

O traço da mistura foi composto por 94% de pedrisco, 3% de pó de pedra e 3% de cal CH-1, como pode ser analisado na Figura 4. Essa composição enquadrou-se dentro da faixa II conforme a especificação DNER ME 386/99.

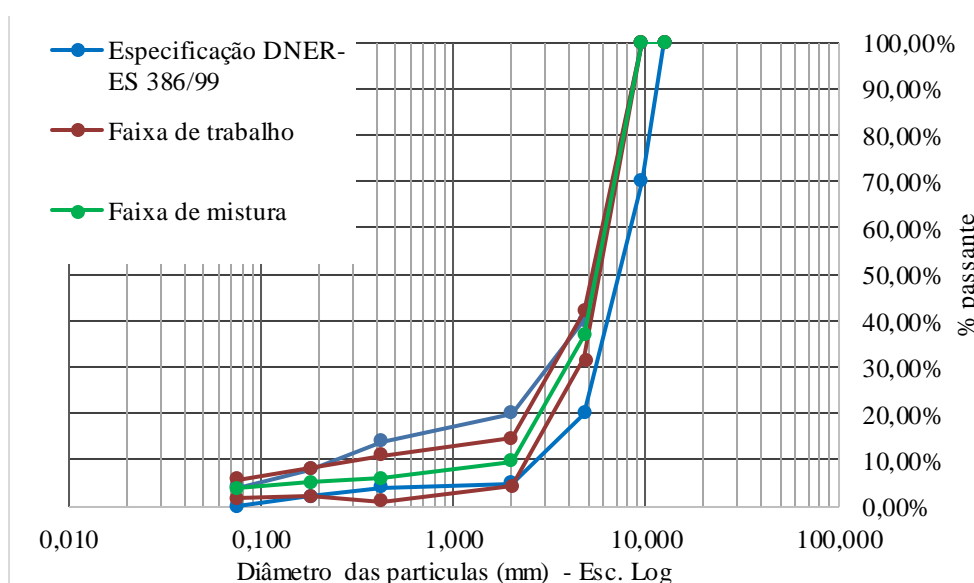


Figura 4. Curva granulométrica das misturas

Após a definição da faixa granulométrica e a definição das proporções de cada material constituinte nas misturas asfálticas do tipo CPA na faixa II, foram realizadas as moldagens de quatro traços de corpos de prova por meio da metodologia Marshall, conforme DNER-ME 043/95 com teores de ligante de 4,0, 4,5, 5,0, 5,5 e 6,0%. A primeira composição foi denominada como traço de referência composta por agregados pétreos, filler e ligante asfalto-borracha TIREFLEX AB8. Os demais conjuntos de misturas foram compostos de agregados pétreos, filler e CAP 50/70 com incorporação de 3, 5 e 7% de PEBD na substituição em peso na massa do ligante. As moldagens dos corpos de prova foram feitas com o compactador Marshall.

A temperatura de aquecimento do ligante para o primeiro grupo de amostras foi de 185 °C. Para os grupos de corpos de provas com substituição parcial da massa do ligante por PEBD, a temperatura de aquecimento do ligante foi de 175 °C. Foram dados 75 golpes em cada face dos corpos de provas e os moldes cilíndricos estiveram aquecidos a 165 °C para garantir a temperatura de compactação. As desmoldagens dos corpos de prova foram feitas após 24h.

O Vv (volume de vazios) foi o parâmetro utilizado para a determinação do teor ótimo de ligante. Para a determinação do Vv, calculou-se os valores de densidade aparente para os corpos de prova, de acordo com a DNER-ME 117/94. Neste trabalho foi utilizado filme PVC para envolver os corpos de prova, ao invés de parafina. Por meio da comparação dos resultados com a massa específica máxima teórica, denominada DMT (densidade máxima teórica) encontrou-se o Vv. Segundo Queiroz (2016), é um dos principais parâmetros a ser considerado em dosagens do tipo CPA, pois se relaciona com a permeabilidade da mistura.

Após a definição do Vv, fez-se o ensaio para determinar o percentual do volume de vazios comunicantes (Vvc). De acordo com Oliveira (2003), o objetivo do ensaio é verificar a proporção de vazios eficazes (conectados) e ineficazes (isolados), para verificar a eficácia da mistura quanto a permeabilidade, é de grande importância o ensaio de determinação de Vvc.

Para a realização deste ensaio foram adotados os procedimentos recomendados pela Associação de Rodovias do Japão (1996, *apud* Oliveira, 2003). Os procedimentos do ensaio estão descritos a seguir:

- ✓ Medir com paquímetro os corpos de prova (altura e diâmetro);
- ✓ Determinar o volume (V) do corpo de prova;
- ✓ Pesar o corpo de prova ao ar (P)
- ✓ Pesar o corpo de prova na água (P'), após mergulhá-los por um minuto;

✓ Calcular a percentagem de vazios comunicantes utilizando-se a Eq. 1 e 2.

$$C = \frac{P - P'}{\gamma_{\text{água}}} \quad (1)$$

em que:

C = Volume dos agregados e poros independentes;

P = Peso do corpo de prova ao ar;

P' = Peso do corpo de prova na água;

$\gamma_{\text{água}}$ = Peso específico da água.

$$V_{vc} = \frac{V - C}{V} \times 100 \quad (2)$$

em que:

V_{vc} = Volume de vazios comunicantes;

V = Volume corpo de prova;

C = Volume dos agregados e poros independentes.

“O ensaio de permeabilidade tem o objetivo de determinar o coeficiente de permeabilidade das misturas e utilizá-lo como parâmetro de funcionalidade no que diz respeito a capacidade de drenar a água sobre a superfície do pavimento” (QUEIROZ, 2016). Para a execução do ensaio foi utilizado um equipamento apresentado na Figura 5 similar ao de TAKAHASHI E PARTL (1999, *apud* Oliveira, 2003), desenvolvido no LMS.

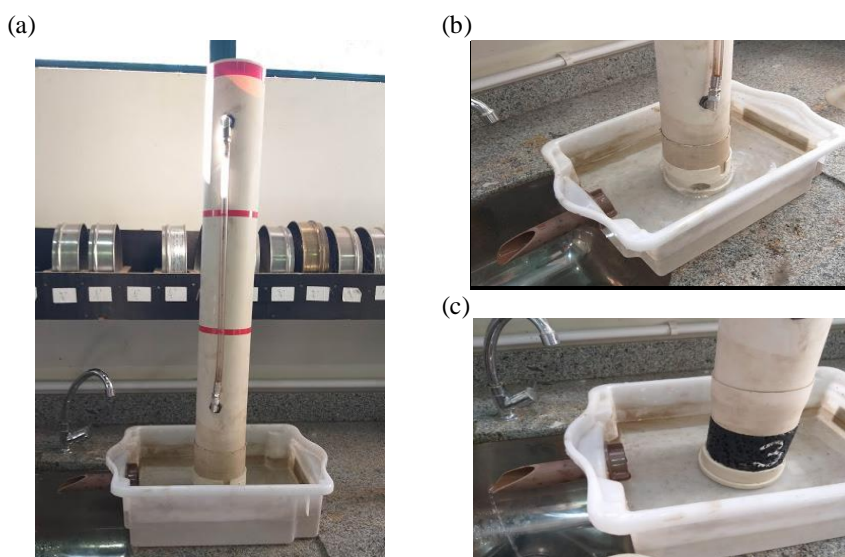


Figura 5. (a) Permeômetro, (b) ensaio de permeabilidade vertical, (c) ensaio de permeabilidade horizontal.

O equipamento permite a medição das permeabilidades horizontal e vertical num ensaio de carga variável.

O princípio do ensaio consiste em vedar o corpo de prova lateralmente para permeabilidade vertical ou a base para permeabilidade horizontal e medir o tempo que leva determinada quantidade de água atravessar o corpo de prova. Para a realização do ensaio foram moldados três corpos de prova no teor ótimo de cada mistura estudada.

O cálculo das permeabilidades horizontal e vertical foram feitos utilizando a Eq 3.

$$k = 2,3 \times \frac{aL}{At} \times \left[\log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \right] \quad (3)$$

em que:

k = Permeabilidade;

a = Área da seção transversal do tubo;

L = Altura da amostra;

A = Área da seção transversal da amostra;

t = Tempo para o fluxo entre as duas marcas;

h₁ = Altura da água na marca superior do tubo;

h₂ = Altura da água na marca inferior do tubo.

Para os ensaios de resistência mecânica, foram moldados três corpos de provas no teor ótimo de cada conjunto para determinar o comportamento mecânico sob a ação da carga. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, seguindo as especificações da DNIT – ME 136/2010. Em seguida moldaram-se três corpos de prova de cada conjunto para avaliar o desgaste Cântabro de acordo com a DNER – ME 383/99 utilizando o aparelho de abrasão Los Angeles sem as esferas de aço.

Resultados e discussões

De acordo com o método DNER-ME 078/94 foi realizado o ensaio de adesividade do ligante ao agregado. O objetivo do ensaio é avaliar a propriedade que tem o agregado de ser aderido pelo material betuminoso. A Figura 6 apresenta os resultados após a imersão por 72h em água a 40 °C. Constatou-se que todos os agregados com diferentes tipos de ligantes

obtiveram resultados satisfatórios, pois não apresentaram o deslocamento da película betuminosa.

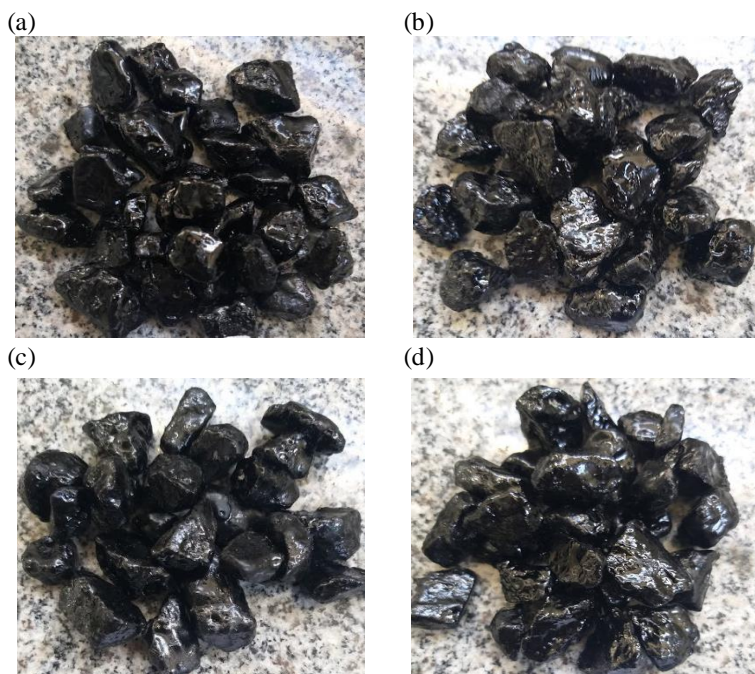


Figura 6. Agregados submetidos ao ensaio de adesividade com diferentes tipos de ligante: (a) ligante asfalto borracha TYREFLEX AB8, (b) ligante convencional CAP 50/70 com 3% de PEBD, (c) ligante convencional CAP 50/70 com 5% de PEBD, (d) ligante convencional CAP 50/70 com 7% de PEBD

O ensaio de penetração foi realizado de acordo com a norma DNIT 155/2010, observou-se durante o ensaio a separação de fase entre o ligante e polímero, ficando o polímero na parte superior, ocasionando um resultado inexato. Para obter um resultado mais preciso foi realizado novamente o ensaio e resfriado o ligante em banho de água até obter uma viscosidade maior onde em descanso não permitiu que ocorresse a separação das fases, como pode ser observado na Figura 7.

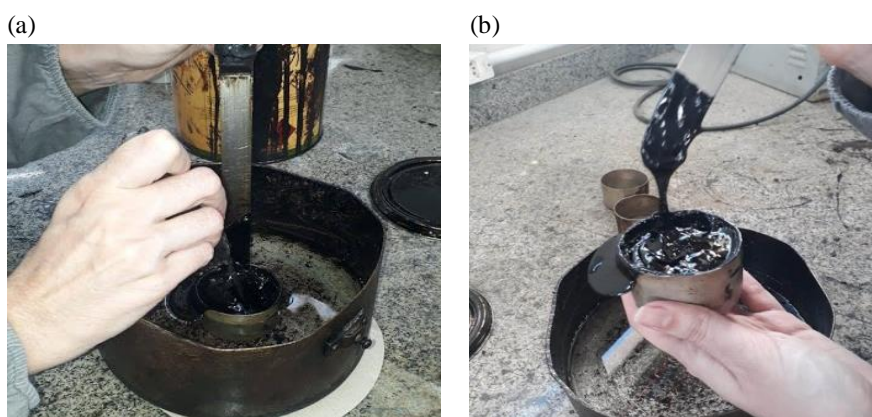


Figura 7. Ligante submetido ao ensaio de penetração: (a) ligante com incorporação de PEBD sendo resfriado em banho de água, (b) ligante após resfriado em banho de água.

De acordo com Negrão (2006), o ensaio de penetração não caracteriza perfeitamente a qualidade do ligante, porém indica seu grau de dureza, sendo utilizado como parâmetro de classificação. Conforme resultados apresentados na Figura 8, o ligante com incorporação de 3, 5 e 7% de PEBD obteve resultados de 19 mm, 21 mm e 14 mm respectivamente, ou seja, as amostras apresentaram maior resistência a penetração. “O ensaio de penetração indica a medida da consistência e rigidez do ligante asfáltico, sendo que menor penetração corresponde maior consistência do material” (BASTIDAS, 2017).

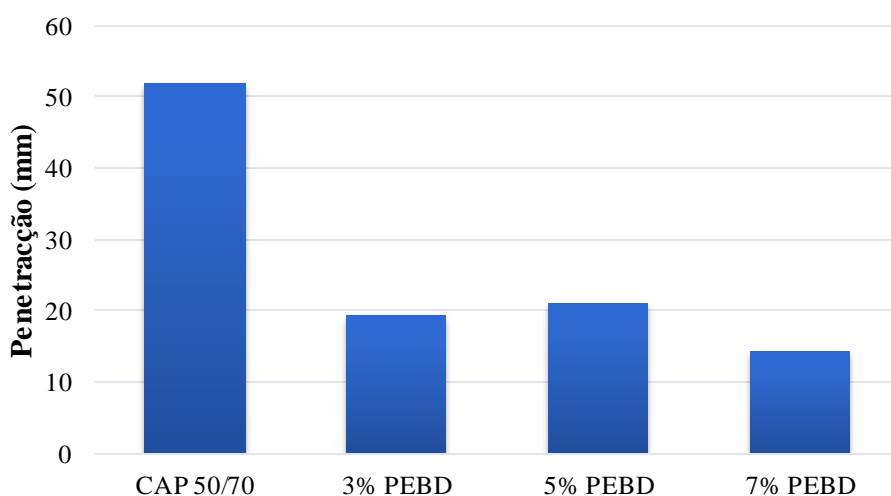


Figura 8. Resultados ensaio de penetração

O ensaio para determinar a densidade aparente dos corpos de prova seguiu as recomendações da DNER-ME 117/94. Na Tabela 5 são apresentados os resultados para as quatro composições. A DMT alcançada para a mistura de referência foi com teor de ligante de 4,0%, enquanto para as misturas com 3, 5 e 7% de PEBD apresentou DMT com teor de 5,5%.

Após a determinação da densidade aparente da mistura, foram calculados os percentuais de vazios dos corpos de prova. Na Tabela 5 são apresentados os percentuais de Vv para cada mistura. Segundo a DNER-ES 386/99, o Vv exigidos para as misturas asfálticas do tipo CPA devem variar de 18 a 25%, pela a análise dos resultados pode-se constatar que a mistura de referência e a com 3% de PEBD atingiram 24,8 e 23,6% respectivamente, atendendo as especificações da norma e as misturas com 5 e 7% de PEBD encontrou-se um Vv de 25,7 e 29,9% respectivamente, não atendendo as especificações da norma.

Pela a análise dos resultados pode-se observar a influência do PEBD nesta propriedade. Com o aumento da incorporação do polímero no ligante, mostra que ocorre um

decréscimo na densidade aparente e um acréscimo no Vv. Esta diminuição ocorre pelo fato de estarmos introduzindo um polímero com densidade inferior à do ligante.

Tabela 5. Volume de vazios

| | Teor de ligante (%) | Densidade aparente (g cm ³) | Densidade máx. teórica (g cm ³) | Volume de vazios (%) |
|---------|---------------------|---|---|----------------------|
| REF. | 4,0 | 2,33 | 2,84 | 18,00 |
| | 4,5 | 2,16 | 2,82 | 23,30 |
| | 5,0 | 2,10 | 2,79 | 24,80 |
| | 5,5 | 2,06 | 2,76 | 25,30 |
| | 6,0 | 2,08 | 2,74 | 24,00 |
| 3% PEBD | 4,0 | 2,06 | 2,84 | 27,70 |
| | 4,5 | 2,06 | 2,82 | 26,70 |
| | 5,0 | 2,08 | 2,79 | 25,30 |
| | 5,5 | 2,11 | 2,76 | 23,60 |
| | 6,0 | 2,09 | 2,74 | 23,90 |
| 5% PEBD | 4,0 | 1,07 | 2,84 | 30,70 |
| | 4,5 | 2,03 | 2,82 | 28,00 |
| | 5,0 | 2,02 | 2,79 | 27,50 |
| | 5,5 | 2,05 | 2,76 | 25,70 |
| | 6,0 | 2,00 | 2,74 | 27,10 |
| 7% PEBD | 4,0 | 1,94 | 2,84 | 31,70 |
| | 4,5 | 1,90 | 2,82 | 32,70 |
| | 5,0 | 1,81 | 2,79 | 35,20 |
| | 5,5 | 1,94 | 2,76 | 29,90 |
| | 6,0 | 1,82 | 2,74 | 33,40 |

Por meio dos procedimentos recomendados pela Associação de Rodovias do Japão (1996, *apud* Oliveira, 2003), foi realizado o ensaio de determinação do percentual de Vvc da mistura no teor ótimo. Para Kolodziej (2016), o objetivo do ensaio é a verificação da eficácia da mistura, pois mede o percentual de vazios que contribuem para a percolação da água. A Tabela 6 apresenta a média dos percentuais de Vvc nas quatro misturas. A amostra de referência apresentou 15,66% de Vvc, nas misturas com incorporação de PEBD ocorreu um decréscimo no Vvc. Pode-se observar que com a incorporação de polímero na mistura, ocorreu o aumento do Vv e decréscimo de Vvc.

Tabela 6. Relação entre o Volume de vazios e Vazios comunicantes

| | Teor de ligante (%) | Volume de vazios (%) | Vazios comunicantes (%) |
|---------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| REF. | 5,0 | 24,80 | 15,66 |
| 3% PEBD | 5,5 | 23,60 | 11,42 |
| 5% PEBD | 5,5 | 25,70 | 11,83 |
| 7% PEBD | 5,5 | 29,90 | 13,72 |

Na Figura 9 são apresentados os valores médios de permeabilidade horizontal, vertical e equivalente realizado nas misturas.

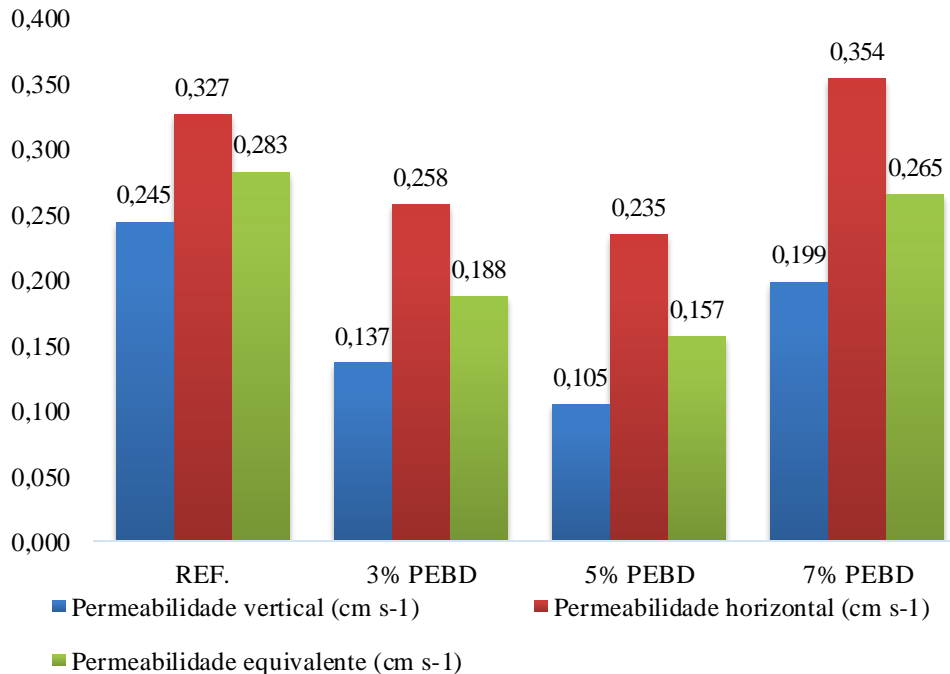


Figura 9. Valores médios das permeabilidades vertical, horizontal e equivalente

Os valores de permeabilidade horizontal em ambas as misturas foram superiores a permeabilidade vertical. Isso pode ser, devido o agregado ser muito lamelar, segundo Oliveira (2003) os agregados possuem uma maior tendência de acomodação dos lados de maior dimensão na posição horizontal, possibilitando que a água percorra um menor caminho na horizontal do que na vertical, favorecendo uma certa anisotropia na mistura. Segundo a ASTM D7064-13 (2013, *apud* Jacques, 2018), é recomendado uma permeabilidade de 0,116 cm.s⁻¹ ou superior. Em comparação com a mistura de referência, as misturas com incorporação de PEBD apresentaram menor permeabilidade horizontal, com exceção da mistura com 7% PEBD que apresentou valor superior da mistura de referência.

Com relação a permeabilidade equivalente, as misturas se comportaram conforme o V_{vc} apresentados na Tabela 6, as misturas referência e 7% PEBD obtiveram maior V_{vc} , conseqüentemente, maior permeabilidade equivalente. Para as misturas de 3 e 5% PEBD apresentaram menor V_{vc} , dessa forma, obtiveram menor permeabilidade equivalente.

Na Tabela 7 são apresentados a média dos resultados dos ensaios de desgaste cântabro e resistência a tração por compressão diametral.

Tabela 7. Resultado dos ensaios de cântabro e resistência a tração por compressão diametral

| | Teor de ligante (%) | Cântabro (%) | Resistência a tração por compressão diametral (kgf cm ²) |
|------------------------------|---------------------|--------------|--|
| REF. | 5,0 | 22,36 | 2,44 |
| 3% PEBD | 5,5 | 19,61 | 2,70 |
| 5% PEBD | 5,5 | 16,26 | 3,07 |
| 7% PEBD | 5,5 | 17,83 | 1,71 |
| Especificação DNER-ES 386/99 | | < 25,00 | > 5,50 |

No ensaio de desgaste cântabro os resultados atenderam as especificações da DNER-ES 386/99 de no máximo 25% de desgaste, de acordo com a Tabela 7 a mistura de referência apresentou maior desgaste cântabro. Com o aumento da incorporação de PEBD ocorreu um decréscimo no desgaste das misturas com 3, 5 e 7% de polímero. A mistura com 7% de PEBD apresentou desgaste superior ao da mistura com 5%, isso pode ser explicado pelo fato da mistura apresentar elevado Vv. De acordo com Kolodziej (2016), misturas com maiores percentuais de Vv e Vvc, necessitam de um teor de ligante maior para ter um desgaste menor.

Os resultados dos ensaios mostraram uma tendência de aumento da resistência a tração por compressão diametral com o aumento da quantidade de PEBD na mistura, com exceção da mistura com 7% de PEBD. Pela análise dos resultados encontrados, observa-se que as misturas não atenderam as especificações da DNER-ES 386/99 de no mínimo 5,5 kgf cm².

As misturas com 3 e 5% de PEBD apresentaram maior resistência a tração por compressão diametral, isso pode ser explicado devido ao ligante apresentar maior dureza em relação a amostra de referência que apresenta um comportamento mais elástico. Segundo Quintana, Gómez e López (2010), as misturas com asfalto modificados com PEBD tendem a apresentar comportamento rígido, em baixas temperaturas de serviços as misturas podem ter um comportamento frágil. As misturas com 3 e 5% também apresentaram menor perda de massa em relação a mistura de referência, resultando em uma mistura com boa coesão, conseqüentemente apresentando maior resistência a tração. A mistura com 7% de PEBD apresentou menor resistência a tração por compressão diametral, isso pode ser explicado pelo fato da mistura apresentar elevado Vv.

Conclusão

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de PEBD como aditivo em misturas asfálticas do tipo CPA usando cimento asfáltico de petróleo convencional (CAP 50/70). O

desempenho das misturas asfálticas com incorporação de PEBD no ligante convencional foi comparado com a mistura moldada com ligante asfáltico modificado por borracha (TYREFLEX AB8).

A presença de PEBD nas misturas provocou um aumento no V_v , houve uma redução da densidade aparente das misturas devido à baixa densidade do PEBD em relação aos outros constituintes da mistura. Apenas as misturas de referência e a com 3% de PEBD atenderam as especificações da norma DNER-ES 386/99.

As misturas com incorporação de PEBD diminuíram o percentual de V_{vc} e a permeabilidade. As misturas com 3 e 5% de PEBD apresentaram menores permeabilidades, pelo fato das misturas apresentarem maior coesão entre os grãos. Em comparação com a mistura de referência, o decréscimo da permeabilidade das misturas foi de 33,57% com 3% de PEBD, 44,52% com 5% de PEBD e 6,36% com 7% de PEBD.

No ensaio Cântabro as misturas com PEBD apresentaram desempenho superior em relação a de referência, nas misturas com 3 e 5% de PEBD ocorreu o aumento da resistência a tração por compressão diametral e a mistura com 7% de PEBD houve o decréscimo na resistência a tração. Mesmo assim, todas as misturas ficaram fora das especificações da norma DNER-ES 386/99 por não atenderem o mínimo de $5,5 \text{ kgf cm}^{-2}$.

Em relação aos ensaios de penetração do CAP 50/70 com incorporação de PEBD, apresentou resultados de maior dureza do CAP, obtendo-se um ligante que pode apresentar maior resistência as condições de rodagem e menos sensíveis às variações de temperatura, conseqüentemente menores deformações permanentes, em contrapartida, o CAP com maior dureza perde a sua elasticidade, ficando mais rígido e suportando menos as deformações das camadas inferiores.

Destaca-se que a incorporação de polímero no ligante asfáltico, promove nas misturas maior coesão do esqueleto pétreo e boa adesividade do ligante ao agregado, resultando em uma mistura com boa empregabilidade para o tráfego pesado, promovendo um aumento na durabilidade dos pavimentos.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que o PEBD corresponde a um aditivo melhorador das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, proporcionando melhorias nos ensaios de cântabro e o aumento da resistência a tração por compressão diametral. Porém devem-se realizar outras pesquisas para conseguir uma conclusão mais precisa sobre o uso de PEBD nas misturas asfálticas.

Recomendações para trabalhos futuros

Recomenda-se que seja feito um ajuste na granulometria dos agregados para as amostras atenderem o mínimo de Vv e Resistência a tração por compressão diametral;

Produzir misturas asfálticas com incorporação de PEBD utilizando outras faixas da especificação da DNER-ES 386/99;

Elaborar uma metodologia de incorporação do PEBD com controle da agitação e temperatura;

Analisar o desempenho da adição de PEBD frente às deformações permanentes;

Analisar o desempenho da adição de PEBD frente ao fissuramento e trincamento devido as variações térmicas;

Analisar o desempenho da adição de PEBD frente as diferentes temperaturas de usinagem e compactação.

Referências

ARAO, M. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (PET) triturado**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMAS TÉCNICAS. **NBR 6576: Materiais Betuminosos Determinação da Penetração**. Rio de Janeiro, 1998.

BASTIDAS, J. G. **Asfaltos e misturas modificados com materiais alternativos**. 2017. 206 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 2017.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica Para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2008. 504 f.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa Rodoviária 2016**. 2017. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>. 30 set. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada**: Dados do Anuário CNT do Transporte mostram baixa oferta de infraestrutura para o transporte rodoviário e crescimento acelerado da frota. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>. Acesso em: 30 set. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 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 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 078/94:** Agregado Graúdo – adesividade ao ligante betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

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 083/98:** Agregados – Análise granulométrica. 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 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 ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 117/94:** MISTURA BETUMINOSA - Determinação da densidade aparente. 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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 155/2010:** Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

IBGE (Org.). **Pesquisa Industrial Anual – Produto.** 2016. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/industria/9044-Pesquisa-industrial-anual-produto.html?=&t=downloads>. Acesso em: 2 nov. 2018.

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.

KOŁODZIEJ, V. M. **Estudo das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas de revestimentos asfálticos porosos**. 2016. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

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. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2003.

QUEIROZ, B. O. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com politereftalato de etileno (PET)**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

QUINTANA, Hugo Rondón; GÓMEZ, Wilmar Fernández; LÓPEZ, William Castro. 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.

YILDIRIM, Y. (2007). **Polymer modified asphalt binders**. Department of Civil Engineering, Texas University at Austin. *Construction and Building Materials*. (21): 66–72.