

Pré-misturado a frio contendo escória de aciaria: Uma alternativa viável para construção de pavimentos

Rita de Cássia Barreto de Araújo Loures¹, Antônio Carlos Rodrigues Guimarães²,
Ben-Hur de Albuquerque e Silva³, Carmen Dias Castro⁴

¹Instituto Militar de Engenharia, ritaloures@yahoo.com.br

²Instituto Militar de Engenharia, guimaraes@ime.eb.br

³Instituto Militar de Engenharia, benhur@ime.eb.br

⁴Instituto Militar de Engenharia, carmendc14@gmail.com

Recebido:

7 de maio de 2017

Aceito para publicação:

21 de novembro de 2017

Publicado:

30 de abril de 2017

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chaves:

Pavimento de baixo custo,
Materiais alternativos,
Agregado siderúrgico,
Emulsão asfáltica modificada por
polímero.

Keywords:

Low cost pavement,
Alternative materials,
Steel aggregate,
Polymer modified asphalt emulsion.

DOI:10.14295/transportes.v26i1.1372

RESUMO

As misturas asfálticas do tipo Pré-Misturado a Frio (PMF) podem ser uma alternativa técnica, econômica e ambiental às misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ). Entretanto a baixa resistência mecânica do PMF produzido com os materiais convencionais atende somente às solicitações de carga de tráfego leve. Como uma alternativa para ampliação do uso desta técnica, tem-se a utilização de agregados alternativos, principalmente resíduos da indústria siderúrgica, tal como a escória de aciaria. No estado do Rio de Janeiro (RJ), no bairro de Santa Cruz na zona oeste, a prefeitura do RJ possui uma usina de produção de mistura asfáltica PMF e também está localizada a Empresa Siderúrgica CSA, que tem interesse em dar um destino para sua produção de agregado siderúrgico. Nesse estudo, para avaliação da utilização da escória de aciaria em misturas do tipo PMF foram dosadas misturas com emulsão convencional e modificada por polímero e submetidas aos ensaios para avaliação do comportamento mecânico: estabilidade Marshall, resistência à tração (RT), vida de fadiga por compressão diametral e dano por umidade induzida. A mistura de PMF foi aplicada em duas vias da zona oeste do RJ e foram avaliadas quanto à deflexão e extraídos corpos de prova para verificação da resistência pela estabilidade Marshall e RT. Concluiu-se, a partir dos resultados obtidos tanto de campo como de laboratório, que o pavimento resistiu às solicitações, cujas magnitudes o caracterizam como de tráfego médio.

ABSTRACT

The asphalt mix of pre-mixed type can be a technical, economical and environmental alternative for asphalt mixtures of the HMA (Asphalt Mixture Hot) type. However, the low mechanical resistance of the PMF (Pre-Mixed Cold) produced with the conventional materials only serves for low traffic load. The mechanical behavior can technically be improved with a steel slag, which is an alternative for aggregates of mineral origin with a material resistance and RJ has a premixed cold mixing production plant and in the same the city hall place is also located in Company Steelworks CSA, which has great interest in a destination for the residual material of its steel production, the steel slag, which has a in large dimension deposits. In order to evaluate the contribution of the steel slag in the PMF, the mixtures with conventional emulsion and polymer modified were submitted to resistance test and mechanical behavior. The PMF mixture was applied in two stretches of the west zone of RJ and after execution were evaluated for deflection and extracted test specimens for resistance verification. The results obtained served the load requests for medium traffic roads.



1. INTRODUÇÃO

Durante a aplicação das misturas asfálticas usinadas a quente, devido à temperatura elevada, formam-se os fumos que, em consequência de sua composição de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA), são cancerígenos, podendo colocar em risco a saúde dos trabalhadores diretamente envolvidos na aplicação desses tipos de mistura. Segundo Guimarães (2004) o material particulado fino emitido durante a pavimentação com asfalto contém partículas inferiores a 2,5 micrômetros (μm), que conseguem entrar nos pulmões e atingirem os alvéolos, podendo passar para a corrente sanguínea e linfática dos trabalhadores e, como os particulados das misturas a quente adsorvem HPA, ocorre o risco quanto à saúde ao terem este agente químico circulando no sangue. Por este motivo tanto as misturas mornas quanto as misturas ditas "a frio" devem ter seu uso estimulado na prática.

As misturas asfálticas usinadas a quente (CAUQ) têm seu custo elevado devido ao preço do Cimento Asfáltico do Petróleo (CAP) e, também, pelo alto consumo de energia durante o seu processo de usinagem. Assim, dentro desta realidade, o PMF é uma alternativa mais econômica, devendo atender às qualidades técnicas necessárias para o bom desempenho de um pavimento flexível urbano. A Tabela 1 apresenta a comparação dos custos do CAUQ com CAP 50/70 e do PMF com emulsão asfáltica RM-1C com valores do DNIT/SICRO 2.

Tabela 1: Comparação dos custos unitários de PMF e CAUQ

| Tipos de misturas | Execução (R\$/m ³) | | Usinagem (R\$/m ³) | Despesas Indiretas | Preço Total (R\$/m ³) |
|-------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| | Equipamento | Mão-de-obra | | | |
| PMF | 31,05 | 6,87 | 56,42 | 32,38 | 126,72 |
| CAUQ | 20,01 | 4,77 | 121,78 | 50,29 | 196,82 |

Fonte: DNIT/SICRO 2- Novembro/2016

O CAUQ é 55,3 % mais caro que o PMF considerando o preço total. Já o custo de usinagem do PMF é 115,8% menor que o do CAUQ. Neste sentido, a mistura usinada a frio (PMF) torna-se uma opção atrativa, visto que apresenta custo mais baixo por ser produzida e aplicada à temperatura ambiente, não havendo emprego de energia no aquecimento dos materiais e, também, pela composição com Emulsão Asfáltica do Petróleo (EAP) de valor comercial menor que o CAP. Assim, percebe-se que aumentar a produção e aplicação nos pavimentos flexíveis de misturas asfálticas usinadas a frio do tipo PMF contribui em economia de energia, benefícios ao meio ambiente e, além disso, diminui os riscos à saúde.

Segundo Potti *et al.* (2002), a qualidade do revestimento composto por misturas a frio, assim como a densidade e as propriedades mecânicas finais desejadas, dependem do comportamento de ruptura da emulsão. Portanto, o elemento essencial para misturas à frio depende da escolha de uma emulsão apropriada, com reatividade com o agregado selecionado, e não somente do esqueleto pétreo.

Segundo a ABEDA (2010), a emulsão asfáltica com polímeros é uma evolução das emulsões asfálticas convencionais na qual a presença de elastômeros que proporciona propriedades físico-químicas melhoradas ao asfalto residual. A presença do elastômero no ligante asfáltico o torna mais elástico, mais viscoso, com um ponto de amolecimento mais alto, menos sujeito ao envelhecimento pela presença do ar e do ultravioleta, mais tenaz e coeso, permitindo maior durabilidade ao revestimento asfáltico. Do ponto de vista acadêmico nacional há poucas publicações que comprovam tais benefícios.

A utilização da escória de aciaria com emulsão asfáltica modificada por polímero para produção da mistura asfáltica do tipo PMF pode ser uma solução para o problema de baixa resistência mecânica deste tipo de mistura, devido às características de contribuição destes materiais no desempenho de outros tipos de misturas asfálticas, conforme estudos feitos por Castelo Branco (2004), Roso (2007), Vieira (2009), Rodrigues (2011) e Tavares (2012), entre outros. Em geral, todos esses estudos consistem na aplicação da escória devidamente curada considerando alguma técnica conhecida, como CAUQ, SMA (*Stone Matrix Asphalt*), obtendo-se resultados satisfatórios, porém sendo registradas as peculiaridades

associadas ao emprego da escória, como, por exemplo, a dificuldade de aplicação do procedimento tradicional para dosagem da mistura.

Costa (2014) utilizou o equipamento Soxhlet para realizar lixiviação controlada da escória em tratamento, considerando variadas horas de lixiviação. Amostras de um mesmo lote foram inseridas, uma de cada vez, no equipamento e posteriormente retiradas para realização dos ensaios de caracterização física e expansão pelo método PTM 130. Os resultados indicaram que mesmo para o menor tempo de lixiviação controlada, a expansão tornou-se nula e as demais propriedades físicas mantiveram-se aproximadamente sem alterações, ou seja, trata-se de uma forte evidência de que o procedimento usual de tratamento da escória – de exposição em pátios abertos por 6 meses a 1 ano – para redução da expansão pode ser bastante otimizado.

O termo "escória" é utilizado muitas vezes na literatura tanto para diversos tipos de materiais: escória de aciaria LD, aciaria elétrica, alto forno, escória de ferroniquel, de manganês, etc. Porém, este termo não é muito bem aceito pelos departamentos das siderúrgicas responsáveis pela eventual comercialização do produto, porque lembra algo descartável. Assim, este termo vem sendo sucessivamente substituído pelo termo agregado siderúrgico.

Neste contexto, há estudos sobre uso de Agregado Siderúrgico (AS) em revestimentos mais esbeltos. Castro (2014) mostrou que é viável a utilização do AS em misturas usinadas a frio do tipo Micorrevestimento Asfáltico (MRAF) e que há menor desgaste no revestimento com AS, sendo também o comportamento mecânico superior ao encontrado para mistura com agregado mineral. Para esse mesmo estudo, as deformações medidas no simulador de tráfego de laboratório foram 50% menores que no MRAF com AM. Loiola (2009) utilizou AS em Tratamento Superficial Duplo (TSD) com emulsão asfáltica convencional e modificada por polímero e obteve menores desgastes com os revestimentos moldados com escória de aciaria do que os moldados com brita. Pereira (2013) também avaliou a utilização dos AS em Tratamentos Superficiais Simples (TSS), Duplo (TSD) e Triplo (TST) evidenciando o baixo desgaste nos revestimentos e o TSD, com AS e emulsão convencional, apresentou desempenho superior no simulador de tráfego de laboratório com relação ao agregado convencional.

Desde 1979, a escória de aciaria vem sendo utilizada na infraestrutura de estradas em países como Estados Unidos, Inglaterra, Japão e Canadá. No Brasil, esse uso teve início em 1986 com a execução de 100 km de base e sub-base no estado do Espírito Santo (Silva, 1994). Os estudos desenvolvidos apresentaram a cura da escória de aciaria, quando os óxidos da escória já reagiram e estabilizaram por meio do intemperismo ao longo do tempo, como uma solução para o problema de expansão e concluíram a viabilidade do uso na pavimentação asfáltica.

Embora se saiba que em alguns casos houve registro de ruptura no revestimento asfáltico, devido a da expansão da escória. Tais casos não são usualmente divulgados na forma de artigos científicos ou comunicações técnicas.

Esse agregado alternativo apresenta uma excelente resistência à abrasão medida no equipamento Los Angeles - perdas por abrasão na ordem de 20% a 25% - baixo custo quando comparado ao do agregado mineral britado e sua utilização na produção de misturas asfálticas diminui o problema referente à deposição deste rejeito. Nas literaturas estudadas as misturas usinadas à quente (SMA e CAUQ) com este material apresentaram aumento da resistência à tração e da vida de fadiga em relação às misturas com agregado convencional, e em Tavares (2012) atendeu aos limites de deformação permanente nos ensaios de *Flow Number* e no simulador de tráfego APA (*Asphalt Pavement Analyzer*). Entre as desvantagens de utilização da escória de aciaria nos projetos de misturas asfálticas está a sua absorção elevada, fato que pode alterar de maneira significativa a dosagem da mistura pelos procedimentos tradicionais, acompanhado do aumento do teor de ligantes.

Tendo em vista que diversos estudos já foram realizados com o uso desse agregado alternativo, buscou-se no presente trabalho testar o emprego do agregado siderúrgico em mistura asfáltica usinada a frio do tipo PMF. Para tanto, foi realizada a análise das propriedades físicas e mecânicas de uma mistura

asfáltica de PMF com escória de aciaria e emulsão asfáltica com polímero visando obter um bom comportamento mecânico com análise laboratorial e de campo. A idéia central foi desenvolver uma solução de baixo custo, para utilização em pavimentos de baixo volume de tráfego, de forma a aproveitar a escória de uma siderúrgica localizada no bairro de Santa Cruz, usinada em uma instalação para produção de PMF da prefeitura do Rio de Janeiro, localizada no mesmo bairro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos ensaios laboratoriais, utilizaram-se os equipamentos pertencentes aos laboratórios do IME, COPPE/UFRJ e SECONSERVA (Prefeitura do RJ). Os agregados minerais (Brita 1, Brita 0, pó de pedra), a escória de aciaria e os ligantes asfálticos, emulsão asfáltica convencional (RL-1C) e a emulsão asfáltica modificada por polímero (BETUMIX-L), foram caracterizados conforme as normatizações para os respectivos materiais. Para execução do plano experimental foram avaliadas três misturas de PMF utilizando o método Marshall para obtenção do teor de projeto.

2.1. Materiais

2.1.1. Agregados

Os agregados minerais britados utilizados no trabalho foram fornecidos pela Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro, pela Secretaria de Conservação (SECONSERVA), tendo sido coletados na Usina de PMF de Santa Cruz em Março de 2016, sendo o pó de pedra da pedreira IPÊ Engenharia-RJ, a Brita 0 e Brita 1 da pedreira Santa Luzia.

A escória de aciaria empregada no trabalho foi fornecida pela empresa siderúrgica Thyssenkrupp Siderúrgica do Atlântico - Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA), localizada no bairro de Santa Cruz no município do Rio de Janeiro. As amostras foram coletadas, acondicionadas em tambores de 400 kg e enviadas pelo fornecedor para o laboratório do IME e para o laboratório da SECONSERVA para a fase de caracterização do material. Na segunda fase da pesquisa, produção e aplicação da mistura de PMF, a CSA enviou 110 toneladas de escória de aciaria para Usina de Asfalto de PMF da Prefeitura do Rio de Janeiro, localizada no bairro de Santa Cruz na Zona Oeste a 4,2 km da siderúrgica. Em ambas as situações, a escória foi considerada como não expansiva haja vista o tempo mínimo de seis (06) meses de estocagem no pátio da empresa para cura e somente considerada curada ao apresentar resultado no ensaio de expansão inferior a 3%.

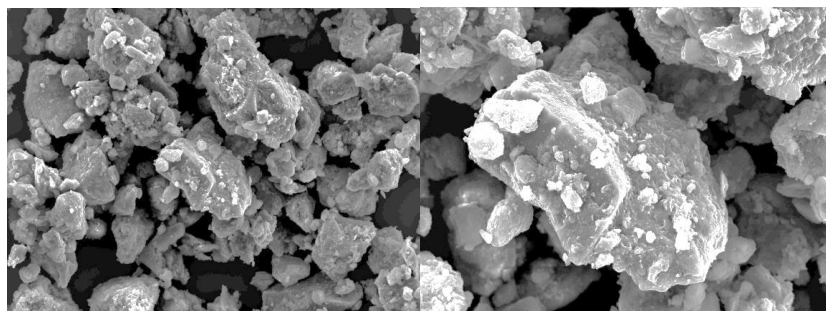
A norma DNER-EM 262/94 determina como valor máximo para expansão da escória de aciaria, para uso em pavimentação, a porcentagem de 3% de expansão total e a ASTM D 2940/03 estabelece o limite de expansão da escória de aciaria em 0,5% para utilização em base e sub-base. O valor de expansão da norma americana é inferior a norma brasileira indicando que esse limite deve ser estudado e discutido. No caso da escória utilizada neste trabalho, o ensaio de expansão da escória de aciaria foi realizado conforme a norma do DNIT 113/2009-ME. O valor obtido de 1,83% de expansão da escória de aciaria na umidade ótima é próximo aos valores obtidos por Costa (2014) de 1,4% de expansão e de Silva (2013) de 1,75% de expansão, mas é superior aos valores obtidos por Tavares (2012), 0,30% de expansão e por Rohde (2002), 0,78% de expansão. O resultado obtido está abaixo do limite de 3% determinado pelo DNIT permitindo a utilização da escória de aciaria em estudo para utilização na mistura de PMF. A Tabela 2 apresenta os ensaios de caracterização dos agregados.

O valor obtido de 1,45 % de absorção da escória de aciaria é alto quando comparado com a absorção dos agregados minerais britados de 0,05 % para brita 1 e 0,15 % para brita 0, porém está abaixo do limite de 2% especificado pela norma DNER-EM 262/94. O valor de absorção obtido na análise da escória de aciaria por Silva (2013) foi 1,38%, Costa (2014) obteve 3,5 % e Tavares (2012) 4,70%. Os valores altos de absorção podem influenciar na dosagem das misturas asfálticas exigindo um valor maior de CAP, teor de ligante asfáltico residual da emulsão asfáltica, no teor de projeto da mistura. A massa específica aparente obtida foi de 3,215 g/cm³, sendo próxima dos resultados alcançados por Costa (2014) e Silva (2013) que foram de 3,00 g/cm³ e 3,12 g/cm³, respectivamente.

Tabela 2: Caracterização dos Agregados Convencionais e da Escória de Aciaria

| ENSAIOS | NORMAS | AGREGADOS | RESULTADOS | LIMITES |
|---------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------|
| TMN | ASTM C 125 | Pó de Pedra | 4,75 mm | - |
| | | Brita 0 | 12,5 mm | - |
| | | Brita 1 | 19,00 mm | - |
| | | Escória de Aciaria | 19,00 mm | - |
| Abrasão "Los Angeles" | DNER-ME 035/98 | Brita 0 | 51,60% | ≤ 50% |
| | | Brita 1 | 50,66% | |
| | | Escória de Aciaria | 18,18% | ≤ 25% |
| Perda ao Choque "Tretton" | DNER-ME 399/99 | Brita 1 | 21,81% | ≤ 60% |
| | | Escória de Aciaria | 10,16% | |
| Equivalente de Areia | DNER-ME 054/97 | Pó de Pedra | 60,70% | ≥ 55% |
| Forma da Partícula | ABNT NBR 6954/1989 | Brita 0 | 91% | Cúbica |
| | | Brita 1 | 89% | |
| | | Escória de Aciaria | 94% | |
| Angularidade | AIMS | Pó de Pedra | Sub-Arredondado | - |
| | | Brita 0 | Sub-Arredondado | - |
| | | Brita 1 | Sub-Arredondado | - |
| | | Escória de Aciaria | Sub-Arredondado | - |
| Forma | AIMS | Brita 0 | Esfericidade Moderada | - |
| | | Brita 1 | Esfericidade Moderada | - |
| | | Escória de Aciaria | Esfericidade Moderada | - |
| Forma 2D | AIMS | Pó de Pedra | Semialongado | - |
| Densidade Real | DNER-ME 194/98 | Pó de Pedra | 2,794 g/cm ³ | - |
| | DNER-ME 195/97 | Brita 0 | 2,646 g/cm ³ | - |
| | | Brita 1 | 2,706 g/cm ³ | - |
| | | Escória de Aciaria | 3,373 g/cm ³ | 3,0 a 3,5 g/cm ³ |
| Densidade Aparente | DNER-ME 195/97 | Brita 0 | 2,635 g/cm ³ | - |
| | | Brita 1 | 2,703 g/cm ³ | - |
| | | Escória de Aciaria | 2,315 g/cm ³ | - |
| Absorção | DNER-ME 195/97 | Brita 0 | 0,15% | - |
| | | Brita 1 | 0,05% | - |
| | | Escória de Aciaria | 1,45% | 2% |
| Adesividade | DNER-ME 078/94 | Escória de Aciaria | Satisfatória | Satisfatória |
| Expansão | DNIT ME 113/2009 | Escória de Aciaria | 1,82% | 3% |

As partículas das amostras de escória de aciaria foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura. As imagens das microestruturas das partículas da escória de aciaria geradas pelo MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), com aumento de tamanho da partícula de 1.000 vezes, permitiram verificar a alta porosidade da superfície do agregado siderúrgico usado neste trabalho, o que justifica o resultado de absorção de 1,45 obtida no ensaio de densidade, considerada alta quando comparada a absorção dos agregados minerais do estudo. Na Figura 1, apresenta-se algumas das imagens geradas pelo MEV.

**Figura 1:** Imagem gerada pelo MEV - partícula de escória de aciaria retida na # N° 10

2.1.2. Emulsão Asfáltica do Petróleo (EAP)

Para a dosagem das misturas asfálticas de PMF foram utilizadas dois tipos de emulsões asfálticas: RL-1C e BETUMIX L (EAP modificada por polímero). A emulsão RL-1C foi fornecida pela SECONSERVA sendo de origem da STRATURA. A emulsão BETUMIX L, emulsão modificada por polímero, é uma emulsão asfáltica de uso comercial desenvolvida pela BETUNEL especialmente para ser utilizada com a escória de aciaria, permitindo uma boa reatividade com o material, melhor adesividade e trabalhabilidade na mistura de PMF com este agregado siderúrgico que apresenta alta absorção.

Para caracterização das emulsões asfálticas RL-1C e BETUMIX L foram realizados ensaios de peneiramento, resíduo por evaporação, ruptura com cimento, viscosidade Saybolt Furol, carga de partícula e densidade relativa.

2.2. Dosagem das Misturas de PMF

Após a caracterização dos materiais foram realizadas as dosagens de três (3) misturas de PMF, considerando-se as seguintes composições de materiais:

- 1) com agregado convencional e emulsão asfáltica convencional, RL-1C;
- 2) com agregado convencional, escória de aciaria e RL-1C;
- 3) com agregado convencional, escória de aciaria e emulsão asfáltica modificada por polímero, BETUMIX L.

A mistura de PMF com emulsão asfáltica RL-1C e agregado convencional foi dosada como mistura de referência e identificada como mistura (1) As misturas (2) e (3) foram dosadas com agregado convencional e escória de aciaria variando o tipo de emulsão asfáltica para avaliação do comportamento deste agregado com cada tipo de emulsão.

As três misturas foram dosadas conforme os procedimentos da norma DNER-ME 107/94 – Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall - sendo adotada para este trabalho a faixa granulométrica C de misturas de PMF do DNIT, norma DNIT 153/2010 – ES.

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

São apresentados na Tabela 3 os resultados dos ensaios de análise das emulsões asfálticas. Todas as especificações da norma DNIT 165/2013 – EM foram atendidas liberando as emulsões para utilização neste trabalho.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de caracterização das EAPs

| Ensaio | Caracterização das Emulsões Asfálticas | | | Valores especificados |
|----------------------------|--|-----------|-----------|-----------------------|
| | Normas | RL - 1C | BETUMIX L | |
| Peneiração (%) | ABNT NBR 14393 | 0,0 | 0,0 | < 0,1 % |
| Resíduo por Evaporação (%) | ABNT NBR 14376 | 60,0 | 60,0 | 60 % (mín.) |
| Ruptura com Cimento (%) | ABNT NBR 6297 | 0,00 | 1,66 | 2% (máx.) |
| Viscosidade SSF, 25°C | ABNT NBR 14491 | 19 | 26 | 70 ssf (máx.) |
| Carga de Partícula | ABNT NBR 6299 | Catiônica | Catiônica | Catiônica |
| Densidade Relativa (25°C) | ABNT NBR 6296 | 1,028 | 1,010 | - |

Na Tabela 4 é apresentado o enquadramento granulométrico dos agregados utilizados na mistura convencional (1) e nas misturas (2) e (3) com utilização de escória de aciaria.

Na Tabela 5 são apresentados os traços de projeto das misturas, que foram compactadas com 75 golpes por face do Corpo de Prova (CP) à temperatura ambiente conforme a norma DNER-ME 107/94 – Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall.

Para obtenção do teor ótimo de projeto foram compactados conjuntos de três (03) CPs com teores residuais de ligante de 4% a 10% para cada tipo de mistura asfáltica. Os CPs que apresentaram densidade aparente com diferenças maiores que 0,02 foram descartados conforme determinado pela norma DNER 117/94 e realizada nova compactação do CP para substituição e para manter o conjunto dos três

(03) CPs por teor asfáltico.

A mistura (1) PMF sem escória + RL-1C e a (2) PMF com escória + RL-1C foram classificadas como PMFSD (semidenso), e a mistura (3) PMF com escória + BETUMIX L foi classificada como uma mistura PMFD (denso), conforme os valores de volume de vazios (Vv) obtidos nas misturas. Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros volumétricos das misturas e valores obtidos nos ensaios de resistência. Para o ensaio de MR, realizado no laboratório da COPPE/UFRJ, adotou-se o nível de confiança de 95%.

Tabela 4: Composição granulométrica das misturas de PMF

| Série ASTM | Abertura (mm) | Composição Granulométrica Mistura (1) | Composição Granulométrica Misturas (2) e (3) | Faixa Específica Faixa C | DNIT |
|------------|---------------|--|---|-----------------------------|------|
| 1" | 25,400 | 100 | 100 | 100 | |
| 3/4" | 19,100 | 96 | 96 | 95 - 100 | |
| 3/8" | 9,520 | 64 | 60 | 40 - 70 | |
| Nº 4 | 4,750 | 23 | 28 | 20 - 40 | |
| Nº 10 | 2,000 | 13 | 21 | 10 - 25 | |
| Nº 200 | 0,075 | 3 | 4 | 0 - 8 | |

Tabela 5: Traços de projeto das misturas de PMF

| PMF | Materiais | | | | Teor de Projeto | |
|-----|-------------|---------|---------|--------------------|----------------------|--------|
| | Pó de Pedra | Brita 0 | Brita 1 | Escória de Aciaria | Resíduo Asfáltico | EAP |
| (1) | 15% | 55% | 30% | - | 5,00% | 8,33% |
| (2) | - | 35% | 23% | 42% | 6,00% | 10,00% |
| (3) | - | 35% | 23% | 42% | 8,00% | 13,33% |

Tabela 6: Resultados físicos e mecânicos das misturas de PMF no teor de projeto

| PMF | Dap g/cm ³ | DMM g/cm ³ | Vv % | VCB | VAM | RBV % | Estabilidade Marshall (kgf) | RT (MPa) | MR (MPa) | Desvio Padrão (MR) |
|-----|--------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|----------|-----------------------------------|-------------|-------------|--------------------------|
| (1) | 2,043 | 2,491 | 17,98 | 9,93 | 27,92 | 35,58 | 400 | 0,24 | 2158 | 501,29 |
| (2) | 2,092 | 2,586 | 19,10 | 12,21 | 31,31 | 38,99 | 450 | 0,26 | 2945 | 504,97 |
| (3) | 2,199 | 2,480 | 11,32 | 17,43 | 28,74 | 60,63 | 320 | 0,26 | 1906 | 459,24 |

Clerman (2004) obteve 260 kgf de estabilidade Marshall, 0,42 MPa de RT e 920 MPa de MR para mistura de PMFSD dosado com 1% de pó de borracha. Rodrigues (2011) obteve 616 kgf de estabilidade Marshall, 0,39 MPa de RT e 1.343 MPa de MR para mistura de PMFD dosado com 80% de Brita 0 de resíduo de ardósia. Os valores obtidos de MR na presente pesquisa para as três misturas foram significativamente maiores que os apresentados pelos autores supracitados, Entretanto do ponto de vista da RT as misturas neste trabalho apresentaram resultados bem menores em relação aos obtidos para esses mesmos autores. A mistura (3) apresentou o menor valor de MR comparada com as misturas (1) e (2).

Nos gráficos apresentados das Figuras 2 e 3, percebe-se que a vida de fadiga da mistura (3) é superior, indicando tratar-se, salvo as limitações comparativas do ensaio, de uma mistura de melhor desempenho.

Utilizando-se os parâmetros K_1 e K_2 obtidos no ensaio de vida de fadiga e adotado K_3 igual a zero para utilização do modelo de comportamento de fadiga do SisPav (Franco, 2007), que é em função do MR e da deformação específica, foi realizada simulação para o tempo de vida útil de projeto no programa SisPav. Para o fator campo laboratório, foi adotado o valor de 10^4 que foi proposto por Pinto (1991), que se baseia em avaliação de campo para concreto asfáltico. A estrutura do pavimento analisada utilizou as espessuras das camadas apresentadas na Figura 4 para o dimensionamento do pavimento. Os valores de N (número equivalente de operações no eixo padrão 8,2 t) foram escolhidos para representarem o tráfego leve, médio e meio pesado, segundo a classificação das vias adotado pela prefeitura de São Paulo (Balbo, 2007; PMSP, 2004). A Tabela 7 apresenta o resultado obtido na simulação do SisPav para estrutura proposta com tempo de vida de projeto de 10 anos.

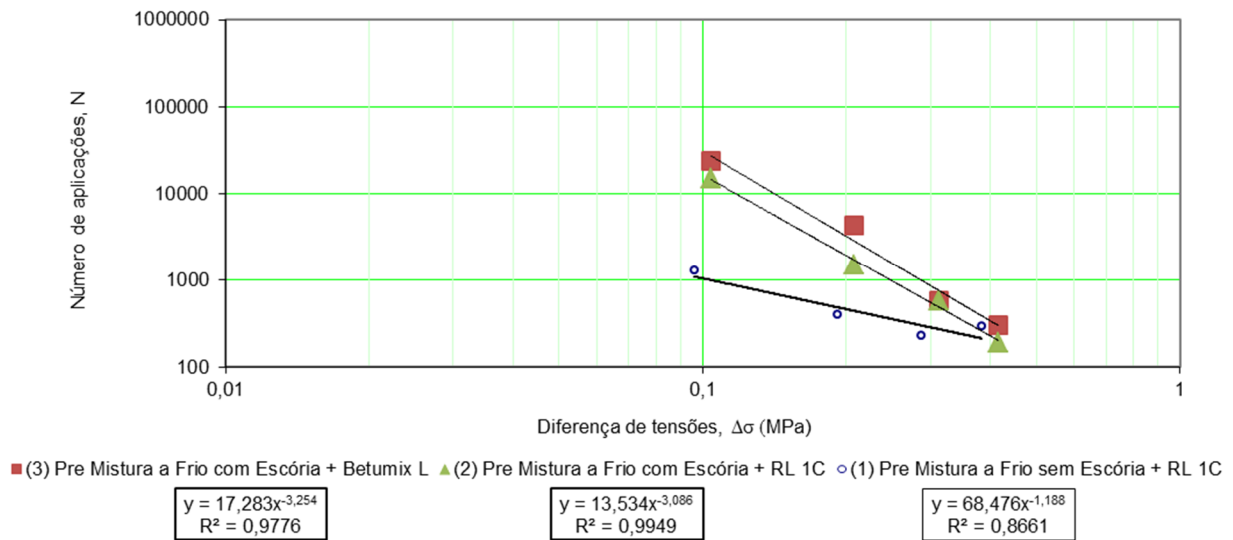


Figura 2: Vida de Fadiga *versus* diferença de tensões das misturas de PMF

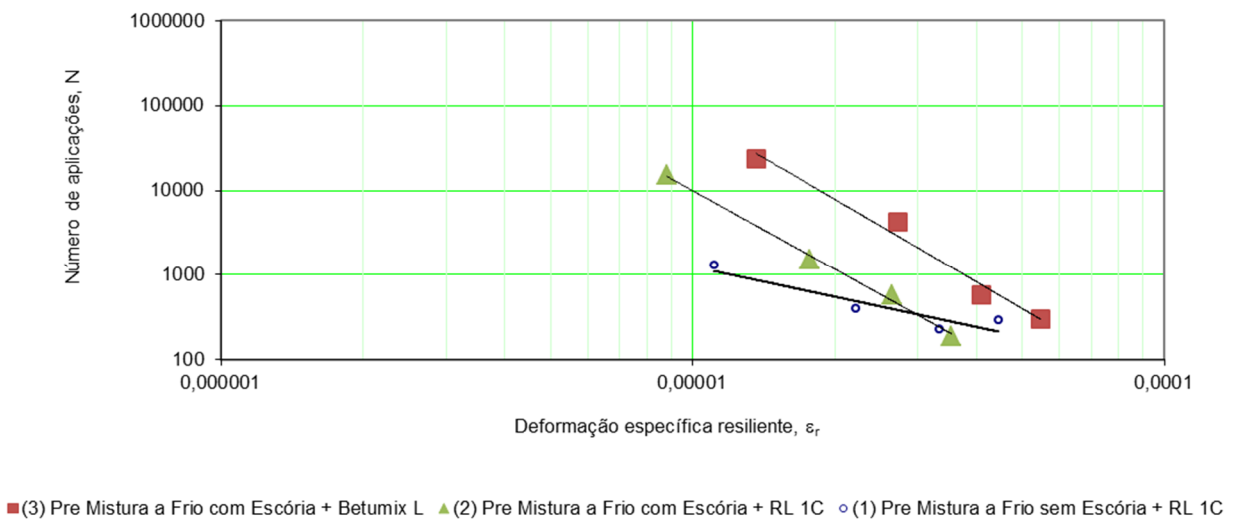


Figura 3: Vida de Fadiga *versus* deformação específica resiliente das misturas de PMF



Figura 4: Estrutura do pavimento utilizado na simulação do Programa SisPav

Tabela 7: Tempo de vida estimado pelo SisPav para o pavimento proposto

| PMF | | VIDA ÚTIL DE PROJETO (ANOS) | | |
|-----|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| | | TRÁFEGO (N) | | |
| | | $9,508 \times 10^4$ (Leve) | $5,515 \times 10^5$ (Médio) | $1,112 \times 10^6$ (Médio/Meio Pesado) |
| (1) | Sem escória + RL-1C | Vida Elevada | 16,3 | 8,1 |
| (2) | Com escória + RL-1C | 6,9 | 1,2 | 0,6 |
| (3) | Com escória + BETUMIX L | 39,8 | 6,9 | 2,7 |

A mistura (1), PMF sem escória +RL-1C, apresentou tempo de vida de projetos mais elevado entre as três misturas de PMF, atendendo às solicitações de carga para tráfegos leve e médio.

A mistura (2), PMF com escória de aciaria mais RL-1C, apresentou tempo de vida inferior à mistura (1) e à mistura (3) para os três níveis de cargas diferentes, não atendendo ao tempo de vida de projeto de 10 (dez) anos para o tráfego leve com $N = 9,508 \times 10^4$. O resultado confirma o valor obtido no ensaio de vida de fadiga para a mistura, que também apresentou o menor tempo de vida de fadiga comparando os resultados obtidos para as três misturas dosadas. A mistura (3), PMF com escória + BETUMIX-L, atendeu o tempo de projeto somente para tráfego Leve. Era esperado pelos pesquisadores da presente pesquisa um maior tempo de vida de projeto para a mistura (3). Para uma melhor avaliação e conclusão faz-se necessário estudo de outros modelos de estudo com misturas de PMF para uma conclusão mais confiável quanto ao tempo de vida de projeto da mistura. As misturas de PMF apresentam MR próximos, mas os coeficientes de regressão obtidos no ensaio de Vida de fadiga e aplicados no modelo no programa determinaram o comportamento diferente entre as misturas de PMF quanto ao tempo de vida de projeto das misturas.

O ensaio de dano por umidade induzida foi realizado conforme os procedimentos da norma AASHTO T 283, com os CPs mantidos envolvidos no filme e plástico durante os banhos de 60°C e 25°C e foi realizado um segundo ensaio conforme descrito por Bernucci *et. al* (2007), com os CPs sem envolvimento do filme e plástico durante os banhos de 60°C e 25°C. O volume de vazios recomendado nos dois procedimentos é entre 7% e 8% para os corpos de prova ensaiados e não há normalização para misturas semi-abertas ou abertas, que têm volumes de vazios maiores que 8%. Optou-se por realizar o ensaio com CPs com os volumes de vazios obtidos no teor ótimo de cada mistura. Como o ensaio não foi concebido para amostras de misturas de PMF com valores elevados de V_v toda conclusão quanto aos resultados obtidos devem ser considerados com restrição. Na atual literatura disponível não foram encontrados resultados do ensaio de dano por umidade induzida para misturas de PMF para comparação com os resultados obtidos neste estudo. Os resultados obtidos nos dois procedimentos são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8: Resultados de dano por umidade induzida sem envolvimento dos CPs para as misturas

| Dano por Umidade Induzida (CP sem filme e plástico nos banhos) | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| PMF | (1) Sem Escória + RL -1C | (2) Com Escória + RL -1C | (3) Com Escória + BETUMIX L |
| RTu (condicionado), MPa | - | 0,13 | 0,09 |
| RT (seco). MPa | 0,24 | 0,26 | 0,26 |
| RRT, % | - | 50,00% | 34,62% |

Tabela 9: Resultados de dano por umidade induzida com envolvimento dos CPs para as misturas

| Dano por Umidade Induzida (CP com filme e plástico nos banhos) | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| PMF | (1) Sem Escória + RL -1C | (2) Com Escória + RL -1C | (3) Com Escória + BETUMIX L |
| RTu (condicionado), MPa | 0,04 | 0,24 | 0,24 |
| RT (seco). MPa | 0,24 | 0,33 | 0,27 |
| RRT, % | 16,67% | 72,73% | 88,89% |

Devido à expansão e a maior absorção da escória de aciaria o resultado esperado para RRT nas misturas compostas com escória era de insatisfatório, mas os resultados obtidos foram superiores ao da

mistura sem escória, que no procedimento sem envolvimento o CP se desfez.

4. TRECHOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados dois trechos experimentais na região oeste da cidade do Rio de Janeiro, no bairro de Paciência e de Ilha de Guaratiba. Foram executadas as camadas de revestimento nos dois trechos com a mistura (3) PMF com agregado convencional + escória + BETUMIX L no teor de projeto (8%). A mistura foi usinada na Usina de Asfalto de Pré-Misturado a Frio da Prefeitura do Rio de Janeiro, situada no Bairro de Santa Cruz.

O material agregado mineral, a escória de aciaria e a emulsão asfáltica utilizada na usinagem da mistura de PMF são da mesma origem e fornecedor do material utilizado no desenvolvimento de dosagem das misturas no estudo e estavam disponíveis em quantidade necessárias para produção e execução dos trechos experimentais.

As bases nas vias eram preexistentes e constituídas por uma camada de material residual de fresagem compactada sobre o subleito. Na avaliação das bases da camada do pavimento existentes nas vias, foi executado o ensaio de Viga Benkelman (DNER-ME 024/94) para avaliação das deflexões. Após conhecidos os valores de deflexão, foi calculada a deflexão característica para verificação do tipo de tráfego aceitável para a base existente, conforme a norma DNER-PRO 011/79. Foi realizada uma pintura de ligação sobre as bases com emulsão asfáltica de ruptura rápida RR-1C e após a ruptura iniciou-se a aplicação da mistura de PMF.

4.1. Trecho executado em Paciência

O trecho executado no bairro de Paciência, localiza-se na Rua A e Rua M, com extensão de 130 m, 5 m de largura e 5 cm de espessura. A deflexão característica da base medida em campo com a Viga Benkelman foi $67 (\times 10^{-2})$ mm, valor não considerado alto e segundo a norma DNER-PRO 011/79 é uma deflexão admissível para $N = 6 \times 10^6$, com desvio padrão de $16 (\times 10^{-2})$ mm e coeficiente de variação de $0,32 (\times 10^{-2})$ mm e, desta forma, atendendo as solicitações de tráfego meio pesado (Balbo, 2007; PMSP, 2004). Aplicando-se a fórmula para cálculo da deflexão máxima admissível segundo a norma DNER-PRO 269/94 foi obtido o valor de $75 (\times 10^{-2})$ mm. Os resultados obtidos no ensaio de Viga Benkelman permitem a aplicação da mistura de PMF sob a base existente não comprometendo o comportamento da camada de revestimento aplicada. A Figura 5 apresenta a dispersão dos valores de deflexão real obtidos no ensaio com 93% dos valores abaixo da deflexão máxima admissível.

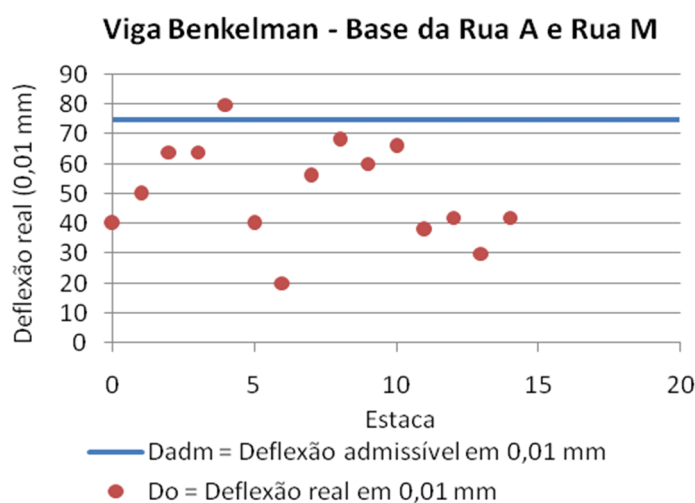


Figura 5: Gráfico de dispersão do ensaio de Viga Benkelman na base das ruas A e M no bairro de Paciência no município do Rio de Janeiro

A aplicação da mistura de PMF foi realizada em dois dias de serviço, 14/10/2016 e 18/10/2016. Foram aplicados 135 t de PMF que foram transportados da Usina até as vias por cinco (5) caminhões. O serviço de espalhamento da mistura de PMF foi executado por máquina acabadora com controle de espessura da camada (5 cm), sendo os acabamentos laterais e as falhas ocorridas no espalhamento corrigidos manualmente por rasteleiro.

A compactação da mistura foi executada por rolo compactador de pneu e chapa vibratória com sistema hidráulico para evitar que a mistura aderisse ao rolo e dificultasse o serviço de compactação arrancando a mistura na passagem do rolo compactador.

Após 15 dias de execução da camada de revestimento com a mistura de PMF foram extraídos CPs para avaliação dos parâmetros volumétricos e ensaio de Estabilidade e RT. A Tabela 10 apresenta os resultados da análise dos CPs extraídos.

Tabela 10: Análise dos CPs extraídos da Rua A e Rua M em Paciência (RJ)

| Análise dos Corpos de Prova extraídos na Rua A e Rua M (15 dias após aplicação do PMF) | | | | | |
|--|------|-------|-------|-------|-------|
| Corpo de Prova (CP) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Dens. Aparente, g/cm ³ | 2,13 | 1,956 | 2,067 | 2,055 | 2,106 |
| Volume de Vazios, % | 15,6 | 22,6 | 17,46 | 20,55 | 18,35 |
| Espessura, cm | 7,3 | 4,84 | 5,35 | 6,84 | 5,66 |
| Resistência à Tração, MPa | 0,27 | - | 0,27 | 0,27 | - |
| Estabilidade (75 golpes), kgf | - | 719 | - | - | 707 |

Os volumes de vazios obtidos apresentam-se acima do Vv de projeto (11,32%) mostrando que não foi alcançando o grau de compactação necessário durante a compactação da mistura de PMF. Os resultados da análise mecânica dos CPs foram satisfatórios com valores de 0,27 MPa de RT e estabilidade Marshall acima de 700 kgf.

4.2. Trecho Executado na Ilha de Guaratiba

Em um trecho de 100 m de extensão e 7,00 m de largura da estrada do Cachimbau, localizada no bairro da Ilha de Guaratiba, distante 15 km da usina de asfalto de PMF de Santa Cruz, foram aplicados 158 t da mistura (3) PMF com agregado convencional + escória + BETUMIX L. A deflexão característica da base é 59 ($\times 10^{-2}$) mm, com desvio padrão 14 ($\times 10^{-2}$) mm e coeficiente de variação de 0,30 ($\times 10^{-2}$) mm, atendendo as solicitações de tráfego com $N = 1,5 \times 10^7$ (tráfego pesado).

A aplicação foi realizada nos dias 12, 13 e 19 do mês de dezembro de 2016. O serviço foi executado manualmente, sem acabadora e foi compactada com rolo compactador de pneu e chapa vibratória com sistema hidráulico. A espessura aplicada foi iniciada com 5 cm conforme a espessura usada na simulação do programa SisPav, mas devido à irregularidade no nível da via houveram trechos no qual a espessura foi de 8 cm, fato que contribuiu para grande quantidade de PMF consumido no trecho.

A espessura elevada dificultou a compactação do material e o processo inicial de cura do PMF foi lento. Foi realizada avaliação deflectométrica na camada de revestimento executada e a deflexão característica obtida foi 48 ($\times 10^{-2}$) mm, com desvio padrão 12 ($\times 10^{-2}$) mm e coeficiente de variação 0,34 ($\times 10^{-2}$) mm, atendendo as solicitações de tráfego com $N = 3 \times 10^7$ mm (tráfego pesado). Aplicando a norma DNER-PRO 269/94 calcularam-se as deflexões máximas admissíveis para a base e para camada de revestimento executada com a mistura (3), respectivamente obteve-se 63 ($\times 10^{-2}$) mm e 55 ($\times 10^{-2}$) mm com 90% e 97% dos valores de deflexão real abaixo da deflexão máxima calculada, conforme apresentado nos gráficos das Figuras 6 e 7.

Devido ao período de chuvas constantes após a execução não foi possível extrair CPs para a avaliação, ficando o acompanhamento da evolução do PMF para continuidade do presente trabalho em data futura.

A partir dos valores obtidos nas deflexões reais da camada de revestimento executada com a mistura

3 e os valores calculados da deflexão admissível e deflexão máxima, pode-se concluir que é viável a construção de pavimentos utilizando PMF contendo escória de aciaria em tráfego com solicitação de até $N = 3 \times 10^7$ mm.

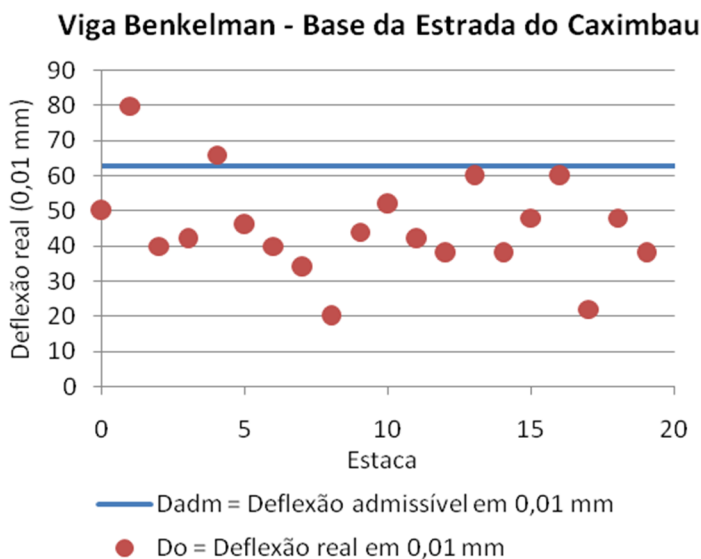


Figura 6. Gráfico de dispersão do ensaio de Viga Benkelman na base da estrada do Cachimbau no bairro de Ilha de Guaratiba no município do Rio de Janeiro

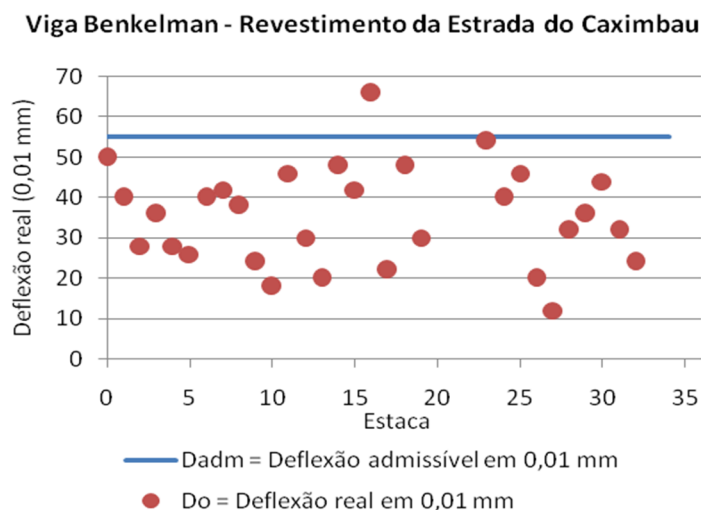


Figura 7. Gráfico de dispersão do ensaio de Viga Benkelman no revestimento executado na estrada do Cachimbau no bairro de Ilha de Guaratiba no município do Rio de Janeiro

5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A partir do exposto, pôde-se perceber que a emulsão modificada por polímero contribuiu com a mistura de PMF com escória no bom envolvimento dos agregados, visto que os resultados dos ensaios de adesividade e dano por umidade induzida apresentaram-se satisfatórios. O resultado obtido no ensaio de dano por umidade induzido na mistura de PMF com escória e emulsão convencional, apesar de ser avaliado com restrição devido a não normalização deste ensaio para misturas de PMF, é um indicador que deve ser considerado para aplicação de misturas de PMF com emulsão asfáltica convencional.

A mistura de PMF com escória de aciaria e EAP BETUMIX L apresentou uma redução significativa no valor de módulo resiliente em relação à mistura contendo emulsão convencional. Entretanto em termos de vida de fadiga observou-se o inverso, ou seja, um incremento na vida de fadiga quando se utilizou a emulsão com polímero. Há na literatura vários trabalhos indicando uma situação semelhante, na qual a adoção do polímero não resultou em aumento de módulo resiliente. O ganho real para o pavimento, a

rigor, só poderá ser verificado a partir da consideração da influência das demais camadas na vida útil do pavimento, embora o melhor comportamento mecânico da mistura contendo polímero, em termos de vida de fadiga, possa ser considerado, na presente pesquisa, como uma evidência de ganho em desempenho.

O resultado da viga Benkelman no revestimento executado permitiu concluir que o PMF com agregado convencional contendo escória de aciaria e emulsão modificada com polímero (BETUMIX L) apresenta um comportamento satisfatório para execução de pavimentos com esse tipo de mistura e os resultados obtidos no ensaio de estabilidade Marshall (719 kgf) é superior ao valor mínimo especificado para misturas à frio (250 kgf) e para misturas à quente (500 kgf) pela norma DNIT. Os valores obtidos das deflexões foram aplicados à norma DNER-PRO 011/79 e a deflexão característica de $48 (\times 10^{-2})$ mm obtida atende ao tráfego com $N = 3 \times 10^7$ mm (tráfego pesado), alcançando o objetivo do trabalho em produzir uma mistura de PMF mais resistente e para um tráfego de maior solicitação.

Os resultados obtidos na caracterização dos materiais, na avaliação de resistência mecânica das misturas produzidas foram satisfatórios e permitem concluir pela viabilidade de utilização da escória de aciaria estudada na produção de misturas asfálticas do tipo PMF, contribuindo para a utilização deste tipo de misturas em pavimentos com tráfego leve e médio.

A cura do PMF necessita de maior investigação para gerar fatores de laboratório/campo e poder obter resultados laboratoriais mais significativos e próximos do campo. Faz-se necessário criar um banco de dados com acompanhamento da evolução do PMF no revestimento implantado para se conhecer a resistência total do PMF ao longo do tempo como mistura asfáltica.

Os trechos executados serão avaliados continuamente para registro de seu desempenho total, o que permitirá uma conclusão mais elaborada do comportamento mecânico desse tipo de mistura aplicada após as solicitações impostas pelas cargas do tráfego e a ação das intempéries.

AGRADECIMENTOS

À Secretaria de Conservação da Prefeitura do Município do Rio de Janeiro, ao Laboratório de Pavimentação da COPPE, à Siderúrgica Thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico – CSA, à empresa Betunel, pela contribuição com o estudo dos materiais e misturas asfálticas e ao Instituto Militar de Engenharia - IME, que contribuíram com o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABEDA (2010) Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, Manual Básico de Emulsões Asfálticas. 2ª edição. Rio de Janeiro - Brasil.
- ASTM D 2940-03 (2003) *Standard Specification for Graded Aggregate Material For Bases or Subbases for Highways or Airports*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- AASHTO T 283 (2007) *Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO M 323, Washington.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação Asfáltica materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Bernucci, L. B.; L. M. G. Motta; J.A.P. Ceratti e J.B. Soares (2007) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. PETROBRAS/ABEDA, Rio de Janeiro.
- Castelo Branco, V. T. F. (2004) *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ.
- Castro, P. B. (2014) *Avaliação do emprego de agregados alternativos em microrrevestimento asfáltico*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza,
- Clerman, D. S. (2004) *Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas a Frio Produzidas com Incorporação de Borracha de Pneus*. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Costa, K. A. (2014) *Um Método Para Beneficiamento de Escórias Visando Aplicação em Pavimentação*. Dissertação (mestrado). – Instituto Militar de Engenharia. – Rio de Janeiro.
- DNER-ME 107/94 (1994) *Mistura betuminosa a frio com emulsão asfáltica – Ensaio Marshall*. Rio de Janeiro.
- DNER-EM 262/1994(1994) *Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários*. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 081/1998 (1998) *Agregado – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Norma rodoviária – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998.
- DNER-ME 078/1994 (1994) *Agregado graúdo adesividade a ligante betuminoso*. Norma rodoviária – Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

- DNER-ME 083/1998 (1998) *Agregados - análise granulométrica. Norma rodoviária - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- DNER-PRO 011/1979 (1979) *Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - Procedimento B*. Norma rodoviária - Método de Ensaio. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 085/1994 (1994) *Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real. Norma rodoviária - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 195/1997 (1997) *Agregados - determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo*. Norma rodoviária - Método de Ensaio. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 194/1998 (1998) *Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman*. Norma rodoviária - Método de Ensaio. Rio de Janeiro.
- DNIT 031/2006 ES (2006) *Pavimentos flexíveis: concreto asfáltico*. Rio de Janeiro.
- DNIT 113/2009-ES (2009) *Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria*. Rio de Janeiro.
- DNIT 153/2010 ES (2010) *Pavimentação asfáltica - Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional - Especificação de serviço*.
- DNIT 165/2013-EM (2013) *Emulsões asfálticas para pavimentação - Especificação de Material*. Rio de Janeiro.
- DNIT SICRO2 (2016) Custos e Pagamentos. Região Sudeste - Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/sicro/sudeste/rio-de-janeiro/2016/novembro/rio-de-janeiro-novembro-2016>>. (Acessado em 14/02/2017).
- Franco, F. A. C. P. (2007) *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPav*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Rio de Janeiro.
- Guimarães, J. R. P. F. (2004) *Toxicologia das emissões veiculares de diesel: um problema de saúde ocupacional e pública*. Blumenau: Revista de Estudos Ambientais, v.6, n.1, p. 82-94.
- Loiola, P. R. R. (2009) *Estudo de agregados e ligantes alternativos para emprego em tratamento superficiais de rodovias*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Fortaleza.
- Pereira, S. L. O. (2013) *Avaliação dos tratamentos superficiais simples, duplo e triplo de rodovias através do emprego de diferentes agregados da região metropolitana de Fortaleza*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza.
- Pinto, S. (1991) *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. Tese (Doutorado) - Coordenação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PMS (2004) *Classificação das vias. Normas e Procedimentos, Urbanismos e Obras, Pavimentação, Instrução de Projeto*, IP_02/2004 Classificação das Vias. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS%20T%C3%89CNICAS%20INSTRU%C3%87%C3%95ES%20NOVAS/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o/IP-02%20%5B1%5D.pdf>>. (Acessado em 06/01/2017).
- PTM 130. *Pennsylvania Testing Method - Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão da Escória de Aciaria*, adaptado pelo DER/MG - RT-01.70/2009.
- Potti, J. J.; D. Lesueur e B. Eckmwnn (2002) *In direction of a cold asphalt mixes method: a optel contribution*. The Optel contribution. European Roads Review, Special Issue, n. 805, p. 38-47.
- Rodrigues, W.C. (2011) *Estudo sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduo industrial de ardósia em mistura asfáltica do tipo Pré-Misturado a Frio*. Tese de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Rohde, L. (2002) *Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos - Estudo Laboratorial*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Roso, J. A. (2007) *Análise do comportamento mecânico nos Aspectos resistência Marshall e à fadiga de Misturas asfálticas densas usinadas a frio*. Tese de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Santana, H. (1992) *Manual de Pré-Misturados a Frio*. Rio de Janeiro, IBP.
- Silva, E. A. (1994) *Uso de escória de aciaria em pavimentação viária*. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, v. 1, p. 261-283.
- Silva, C. N. P. (2013) *Um estudo sobre a viabilidade da utilização de escória de aciaria LD em camadas de pavimentos*. Dissertação (mestrado). - Instituto Militar de Engenharia. - Rio de Janeiro.
- Tavares, D. S. (2012) *Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico*. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Vieira, B. C. (2009) *Análise da Viabilidade do Uso de Pré-Misturados a Frio em Aeródromos*. Trabalho de Conclusão de Curso Graduação. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.