

ESTUDO DO DESEMPENHO A ABRASÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO PROVENIENTE DA MINERAÇÃO DE COBRE

Ricardo Bentes Kato (UFPA) E-mail: r.kato@hotmail.com

José Antônio Souza (UFPA) E-mail: jass@ufpa.br

Resumo: A mineração é uma das atividades econômicas que mais gera resíduo, destacando neste setor a obtenção do minério de cobre com uma média de 1% de cobre para 99% de resíduo gerado. Paralelamente o setor de transportes é um dos que mais consomem materiais na engenharia civil, em particular o setor rodoviário. Neste contexto este artigo tem o objetivo de estudar a adição de resíduo proveniente da mineração do cobre em pavimentos asfálticos, principalmente quanto a propriedade de abrasão. A metodologia consiste em calcular dosagem de projeto de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), areia e agregado graúdo que constituem a mistura de referencia chamada de piloto. Após este passo substituir gradativamente a areia por resíduo, até sua totalidade e então ensaiar os corpos de prova a abrasão (Catambro). Os resultados apontaram que houve uma redução estatisticamente considerável do desgaste a abrasão (em 48% e 62%) com a adição 20 e 25% de resíduo em relação a areia.

Palavras-chave: Material asfáltico, meio ambiente, resíduo de cobre.

STUDY OF ABRASION PERFORMANCE OF ASPHALT PAVEMENTS WITH ADDITION OF RESIDUE FROM THE COPPER MININGUT HERE AN ENGLISH VERSION OF THE TITLE OF YOUR ARTICLE

Abstract: Mining is one of the most economic activity generates waste, highlighting in this sector obtaining the copper ore with an average of 1% copper for 99% of waste generated. At the same time the transport sector is one of the most consumed materials in civil engineering, in particular the road sector. In this context this article aims to study the addition of residue from copper mining in asphalt pavements, especially as the abrasion. The methodology is to calculate dosage CAP project (petroleum asphalt cement), sand and coarse aggregate which constitute the reference mixture called pilot. After this step, replace gradually the sand residue, until full and then rehearse the abrasion proof bodies (Catambro). The results showed that there was a statistically significant reduction of the wear abrasion (48% and 62%) with adding 20 and 25% of waste in relation to sand.

Keywords: Asphaltic material, environment, copper residue.

1. INTRODUÇÃO

O cobre é um dos metais mais antigos a serem utilizados pela humanidade, relatos apontam para cerca de 8.000 anos A.C. chamada de idade do Bronze (cobre + estanho). Nesta época chegou a representar riqueza e poder, na idade média pelas suas características de baixo ponto de fusão, era propício para moldagem de pontas de lança e flechas, sendo moeda de troca entre nações com intuito de armar seus exércitos. Na atualidade, tanto na sociedade industrial, e principalmente na sociedade da informação, o cobre continua mantendo seu poder, visto suas características de transmissão de calor e eletricidade (RIBEIRO, 2001).

As jazidas de cobre são geralmente de grandes dimensões e baixos teores, o que gera grande quantidade de resíduo de mineração, onde em minas de lavra subterrânea, o teor de cobre não deve ficar abaixo de 1% de cobre, e nos de pequeno porte, não deve ser inferior a 3%. Em lavra a céu aberto, o teor mínimo pode atingir 0,5 % de Cobre, somente na serra do

Sossego na região de Canaã dos Carajás no Pará estima-se em cerca de 90.000.000 de toneladas de resíduo (RIBEIRO, 2001).

Derivado do grego “*aes cyprium*”, sendo posteriormente conhecido como “*cuprum*”, o elemento químico cobre é um metal de cor avermelhada de número atômico 29; peso atômico 63,54; dureza 2,5 a 3,0; e ponto de fusão 1.023°C. O que o torna valioso para a indústria é o fato de ser um ótimo condutor de calor e eletricidade, além de possuir elevada resistência à tensão física, à corrosão e ser de fácil formação de ligas com outros metais. Pode ser considerado como cobre o metal que possua pelo menos 99,85 % do elemento cobre, ou no mínimo 97,5 % em massa de cobre.

Segundo o BNDES, como material não ferroso o cobre encontra-se apenas atrás do alumínio em utilização pela humanidade. A indústria de cobre primário preconiza quatro tipos básicos de produtos:

- Minério de cobre: Este é basicamente extraído da mina, onde apresenta baixos teores de cobre, entre 0,7% e 2,5%;
- Concentrado de cobre: Minério de cobre que sofre processo de moagem das rochas e mistura com água e reagentes, apresentando entre 30% e 38% de cobre fino;
- Cobre fundido: O concentrado sofre processos pirometalúrgicos transformando-se em cobre *blister* (98,5%) e, posteriormente, no anodo de cobre, cujo teor é de 99,7% de cobre;
- Cobre refinado: São os anodos e às soluções (no caso da lixiviação) que são refinados por processo de eletrólise, resultando nos cátodos, com pureza de 99,9% de cobre.

O cobre é geralmente encontrado em associado a outros elementos e basicamente em dois grupos de minerais:

- Primários ou sulfetados: explorado em zonas mais profundas da crosta terrestre, com mais alto teor em cobre (80% das reservas mundiais), possui grande apelo econômico, pois pode ser lavrado a céu aberto, com teores de até 1,5% de cobre, sendo os mais importantes:
 - Calcopirita (CuFeS_2 , com 34,6 % de Cu);
 - Calcocita (Cu_2S , com 79,9 % de Cu);
 - Bornita (Cu_5FeS_4 , com 63,3 % de Cu);
 - Covellita (CuS , com 66,4% de Cu);
 - Enargita (Cu_3AsS_4 , com 48,3% de Cu)
- Oxidados ou secundários: explorado em zonas mais superficiais, de menor teor em cobre, com cerca de 170 espécies minerais, das quais apenas algumas apresentam importância econômica, sendo os mais importantes
 - Cuprita (Cu_2O , com 88,8% de Cu);
 - Tenorita (CuO , 79,8%Cu);
 - carbonatados malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, 57,5%Cu);
 - Azurita ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, 55,3% Cu);
 - Silicatados crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 36 % Cu).

Como visto anteriormente as jazidas de cobre são geralmente de grandes dimensões e baixos teores, o que gera grande quantidade de resíduo de mineração, onde em minas de lavra subterrânea, o teor de cobre não deve ficar abaixo de 1% de cobre, e nos de pequeno porte, não deve ser inferior a 3%. Em lavra a céu aberto, o teor mínimo pode atingir 0,5 % de Cobre (RIBEIRO, 2001).

Quanto as reservas mundiais, os maiores detentores são Estados Unidos e Chile, que somam-se 40%, ao todo estima-se que as reservas descobertas atinjam cerca de 607.000.000 de toneladas, o que segundo previsões de demanda daria para abastecer o mundo por aproximadamente de 50 anos. As reservas brasileiras representam cerca de 2,0 % do total

mundial. No Brasil o estado do Pará tem destaque na obtenção deste metal sendo o município de Marabá com reservas medidas da ordem de 618.108.992 toneladas, com teor médio de 0,93% de cobre, correspondendo a 5.767.411 t de cobre contido.

Os principais depósitos no Pará são os de: Salobo, Cristalino, Sossego e Alemão, sendo a maioria sulfetada, contendo ouro, prata e molibdênio. Em Salobo a mineralização está relacionada a xistos em ambiente vulcano-sedimentar e constituem as reservas de cobre mais significativas e promissoras do Brasil, de nível internacional (RIBEIRO, 2001).

Paralelamente no Brasil matriz de transporte brasileira é baseado no modal rodoviário, onde esta modalidade corresponde a cerca de 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 61,8% da matriz de transporte de cargas, possuindo em sua malha mais de 1.000.000 de quilômetros de rodovias.

O concreto asfáltico usinado à quente é o material mais utilizado em pavimentação no Brasil, podendo ser definido como uma mistura de materiais granulares, material de enchimento, um ligante asfáltico em proporções pré-estabelecidas, onde o ligante atua como elemento aglutinante entre os agregados, permitindo que resista às solicitações de tráfego, onde ao final gera um material composto por três fases: agregado, ligante e ar (SPECHT, 2004).

As misturas asfálticas tem como papel fundamental responder a características como (PILATI, 2008):

- Estabilidade: Resistir a formação de deformação permanente quando submetido a carga, tendo como principais fatores de influencia o teor de ligante, a forma e textura dos agregados;
- Durabilidade: Propriedade de manter características reológicas, coesão e adesão, resistindo a desintegração provocada pelo tráfego e intempéries, tendo como principais influentes o volume de vazios, qualidade dos agregados e ligação agregado/asfalto.
- Flexibilidade: proporciona resistência à fadiga, tendo como influentes a quantidade e tipo do ligante, além da temperatura ambiente;
- Resistência a derrapagem: Resistencia ao deslizamento dos pneus dos veículos, tendo como principais influentes a distribuição granulométrica e o teor de ligante.

Juntando os três fatores anteriormente citados (alta geração de resíduo + matriz rodoviária + Concreto asfáltico) justifica-se este trabalho com a utilização deste resíduo como elemento para melhorar propriedades do revestimento asfáltico, no caso deste trabalho a resistência a abrasão (ensaio Catambro).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no laboratório de Misturas Asfálticas da Universidade Federal do Pará (LEMA/UFPA), tendo como base a literatura do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) para caracterização dos materiais, dosagem Marshall e ensaio a abrasão.

Após coleta do resíduo de cobre nas bacias de contenção da mineradora, o material foi secado e homegeinizado até estabilizado de massa. Posteriormente foi executada a caracterização do mesmo, através dos ensaios dispostos na tabela 1.

Tabela 1 – Ensaios de caracterização dos agregados e resíduo.

| Ensaio | Norma |
|-----------------------------|------------------|
| Dimensão máxima do agregado | DNER - ME 083/98 |
| Módulo de finura | DNER - ME 083/98 |

| | |
|-----------------------|------------------|
| Material pulverulento | DNER - ME 266/97 |
| Equivalente de Areia | DNER - ME 054/97 |
| Densidade real | DNER-ME 084/95 |

Com os dados granulométricos foi então elaborada a dosagem de materiais constituintes da mistura (CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente), conforme preconizado pela dosagem Marshall. Posteriormente foi-se substituindo a areia por resíduo até sua totalidade, perfazendo 4 teores: piloto (sem resíduo), 10% de resíduo, 20% de resíduo e 25% de resíduo. Com estas dosagens foi-se em tão moldados 12 corpos de prova (3 de cada teor) e ensaiados a abrasão (DNER-ME- 383/99).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO E AGREGADOS

O resíduo sulfetado proveniente da mineração de cobre é oriundo da serra do Sossego situada no município de Parauapebas/PA. Inicialmente foi realizada a análise granulométrica, ressaltando que foram feitas duas amostras e considerado a média. Conforme tabela 2 pôde-se constatar que o resíduo funcionaria como um agregado miúdo, mais precisamente como uma areia fina.

Tabela 2: Resumo da caracterização dos agregados e rejeito.

| Ensaio | Seixo | Areia | Resíduo |
|------------------------------|----------|---------|---------|
| Dimensão máx. Característica | 19,10 mm | 1,19 mm | 0,59 mm |
| Módulo de finura | 1,18 | 0,31 | 0,24 |
| Teor material pulverulento | 0,70% | 1,47% | 9,72% |
| Equivalente de areia | - | 97,32% | 75,68% |
| Massa específica | 2,499 | 2,644 | 2,861 |

Após caracterização dos agregados e enquadramento na curva granulométrica "C" do DNIT, ficou estabelecido como dosagem piloto, ou amostra branca, a composição de 75% de seixo e 25% de areia. Como definido na metodologia foi procedido a substituição gradativa da areia por resíduo, originando mais 3 dosagens: com 10% de resíduo, com 20% de resíduo e com 25% de resíduo.

3.2. CALCULO DO TEOR ÓTIMO DE CAP

Definidas as dosagens de cada mistura, assim como as temperaturas de mistura e compactação foram confeccionados 60 corpos de prova para proceder os parâmetros Marshall e assim definir o teor ótimo de CAP de cada composição (Piloto, 10% de resíduo, 20% de resíduo e 25% de resíduo).

Conforme os requisitos normativos do DNIT a estabilidade mínima deve ser de 500 Kgf. Este parâmetro foi superado nas misturas dosadas, com superior desempenho nas misturas com adição de resíduo, conforme figura 1.

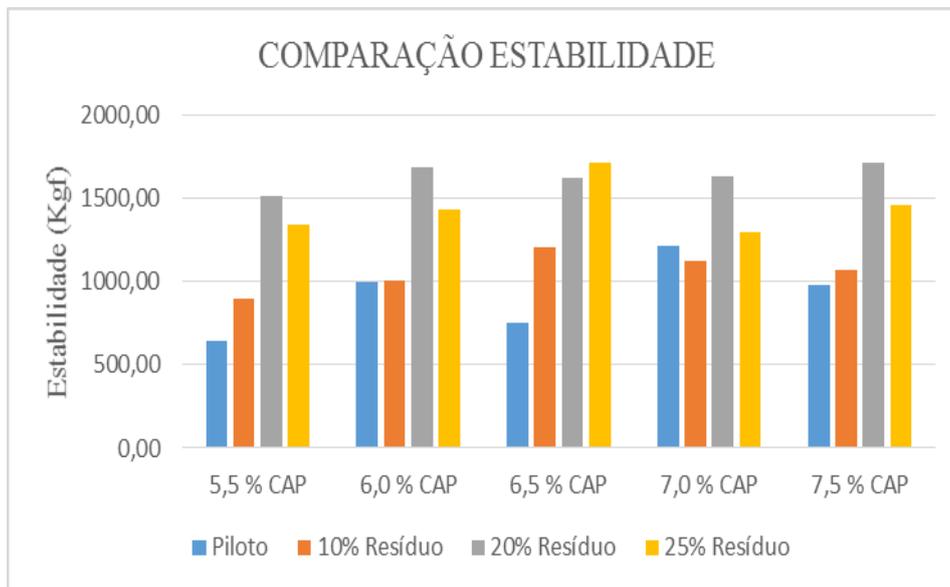


Figura 1: Estabilidade Marshall Média das Dosagens.

O volume de vazios é o fator mais importante, pois além de influenciar a resistência, também promove aumento da durabilidade por dificultar a entrada de agentes agressivos na massa. O DNIT 031/2006 define um limite entre 3% e 5%, nota-se que o teor de 10% de rejeito na massa apresentou o comportamento mais intenso na redução dos vazios da massa, conforme figura 2. Isso se deve ao fechamento da massa provocada pela granulometria dos componentes da mistura:

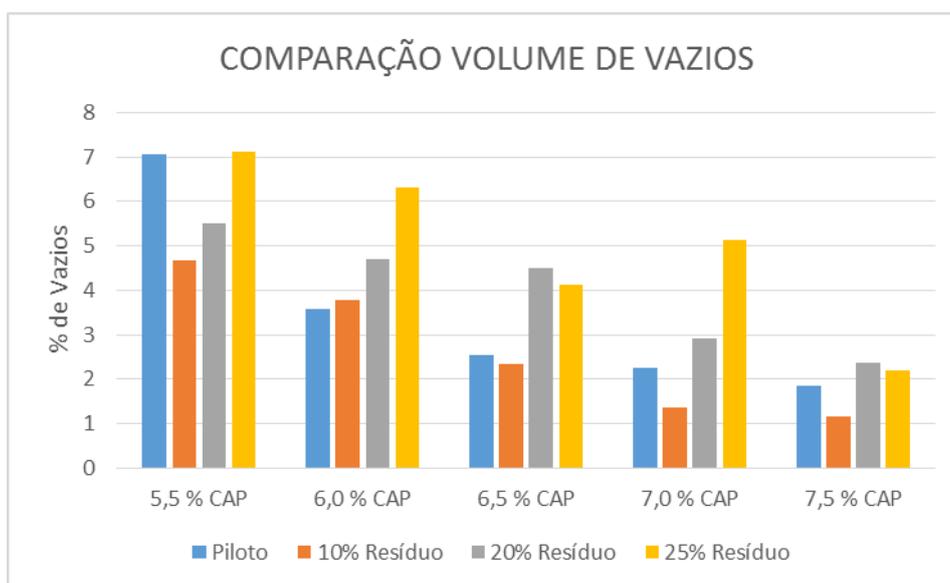


Figura 2: Volume de Vazios Médio das Dosagens.

Após os parâmetros Marshall calculados foi definido o teor de vazios de 4% como alvo da mistura, pois este proporciona uma mistura ao mesmo tempo uniforme e maleável às solicitações de tráfego. Para 4% de vazios está atendida a estabilidade, segundo figura 4 e demais parâmetros, logo pôde-se relacionar o teor de CAP para o teor de vazios indicado pela técnica de regressão linear.

Tabela 3: Teor Ótimo de CAP.

| Teor de rejeito (%) | Teor ótimo (%) |
|---------------------|----------------|
| 0 | 6,12 |
| 10 | 5,80 |
| 20 | 6,57 |
| 25 | 6,98 |

3.3. ENSAIO DE ABRASÃO

Após determinada a dosagem ótima de cada teor de resíduo foram confeccionados 3 corpos de prova de cada teor, perfazendo um total de mais 12 corpos de prova, sendo estes submetidos ao ensaio descrito anteriormente no capítulo de metodologia.

Conforme a tabela 4 pode-se notar uma significativa redução da perda por abrasão em relação a dosagem piloto, realizado o teste de análise de variância, foi apontado que existe diferença significativa entre as amostras, para um erro estatístico de 5%. Realizado o teste de Turkey foi constatado que a diferença ocorre entre as dosagens piloto em relação as dosagens de 20% e 25%, para um erro estatístico e 5%.

Tabela 4 – Ensaio Catambro.

| DOSAGEM | CP | MASSA ANTES | MASSA DEPOIS | ABRASÃO | MÉDIA | DESVIO PADRÃO |
|-------------|-------|-------------|--------------|---------|-------|---------------|
| Piloto | CP 13 | 1.124,19 | 1.068,11 | 4,99% | 4,95% | 0,94% |
| | CP 14 | 1.140,80 | 1.073,85 | 5,87% | | |
| | CP 15 | 1.209,93 | 1.161,55 | 4,00% | | |
| 10% Resíduo | CP 13 | 1.136,05 | 1.103,72 | 2,85% | 3,36% | 0,47% |
| | CP 14 | 1.127,36 | 1.084,99 | 3,76% | | |
| | CP 15 | 1.150,95 | 1.111,08 | 3,46% | | |
| 20% Resíduo | CP 12 | 1.123,39 | 1.089,70 | 3,00% | 2,59% | 0,36% |
| | CP 13 | 1.134,05 | 1.107,87 | 2,31% | | |
| | CP 14 | 1.114,88 | 1.087,47 | 2,46% | | |
| 25% Resíduo | CP 13 | 1.166,56 | 1.145,62 | 1,80% | 1,90% | 0,74% |
| | CP 14 | 1.160,47 | 1.129,27 | 2,69% | | |
| | CP 15 | 1.159,92 | 1.145,80 | 1,22% | | |

Fonte: Dados da pesquisa.

Pode-se verificar segundo a tabela 5 que a redução com a adição de resíduo chega a 61% fato este pela melhor compactação da massa e redução do teor de vazios.

Tabela 5 – Redução da perda por abrasão em ralação a dosagem piloto.

| DOSAGEM | % REDUÇÃO DA PERDA POR ABRASÃO EM RELAÇÃO A DOSAGEM PILOTO |
|---------|--|
| 10% | 32,23% |
| 20% | 47,72% |
| 25% | 61,62% |

Fonte: Dados da pesquisa.

A figura 3 demonstra a excelente correlação entre os dados, acima de 0,99, além do caráter logarítmico do comportamento, o que comprova o comportamento decrescente da propriedade.

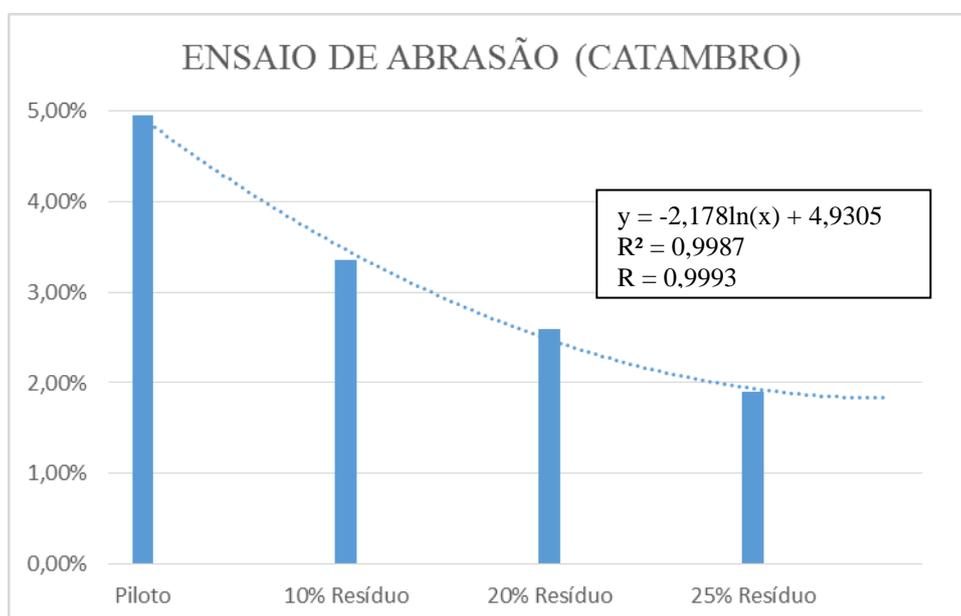


Figura 3- Ensaio Catambro.

4. CONCLUSÕES

Após análise granulométrica pôde-se notar que o resíduo da mineração do cobre se encaixaria como material fino na mistura asfáltica, o que possibilitou a substituição do agregado miúdo gradativamente pelo rejeito, sem sair da faixa “C” do DNIT.

A adição de resíduoo comprovou a hipótese do trabalho pois melhorou todas as características Marshall da mistura, tendo singular importância a redução do teor de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), o que pode ser dado crédito a suas características granulométricas, contribuindo para um maior fechamento dos vazios, fato este que além de proporcionar maior resistência à massa, aumenta também sua durabilidade por dificultar a penetração de agentes agressivos.

Quanto ao desempenho mecânico referente a resistencia a abrasão a análise estatística demonstrou uma redução do desgaste a abrasão da ordem de 50% a 60% para a substituição de areia pelo resíduo, logo conclui-se que a adição de rejeito na mistura asfáltica traz três benefícios imediatos:

- Benefício Tecnológico: redução do teor de vazios e aumento da resistência a abrasão;
- Benefício Ambiental: Consumo do resíduo gerado pela mineração;
- Benefício econômico: redução do teor de CAP nas misturas asfálticas, por ser o componente de maior valor financeiro.

REFERÊNCIAS

CALABREZI, S. R. A multimodalidade para o transporte de cargas: identificação de problemas em terminais visando à integração dos modais aéreo e rodoviário. Dissertação de Mestrado, UEC, Campinas, SP, Brasil, 2005.

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. Pesquisa CNT de Ferrovias 2011. Brasília: CNT, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. *ME - 043/95: Agregados – Análise granulométrica.* Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. *ME – 54/97: Agregados – Equivalente de Areia.* Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. *ME - 266/97: Agregados – Material Pulverulento.* Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. *ME - 117/94. Misturas Betuminosas – Determinação da Densidade Aparente.* Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. *ME - 043/95: Misturas Betuminosas à quente.* Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. *ES 31/2006: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico.* Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

DNP - Departamento Nacional de Produção Mineral. Informe Mineral. Brasília. Jan-Jun 2014.

FAXINA, Alberto Leandro. Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor de ligantes asfalto-borracha. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2006.

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo. *Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos.* 7ª ed. Rio de Janeiro, IBP/Comissão do asfalto, 1999.

LEITE, L.F.M. Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. 1999. 266p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

MOTTA, L.M.G. e LEITE, L.F.M. Desempenho de trechos de pavimentos observados nos últimos 10 anos. 16º Encontro de Asfalto do IBP, 2002, Rio de Janeiro. Anais do 16º Encontro de Asfalto, v. cd.

MUGAYAR, A. N. Avaliação dos efeitos do tipo de asfalto e da distribuição granulométrica do agregado na fluência estática e dinâmica de misturas asfálticas densas. Dissertação de Mestrado. USP, São Carlos, SP, Brasil, 2004.

PATRIOTA. Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado à quente modificado com borracha reciclada de pneus - processo seco. Dissertação de Mestrado, UFP, Recife, PE, Brasil, 2004.

PILATI, Fernanda. Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo do óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2008.

READ, J. M.; COLLOP, A. C. Practical fatigue characterization of bituminous paving mixtures. In: Journal of the Association of Asphalt Paving. V66. p74-101. St Paul, 1997.

RIBEIRO, J. A .S. Balanço Mineral Brasileiro. Brasília, 2001.

SPECHT, Luciano Pivoto. Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneu. Tese de Doutorado. PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS. 2004.