

Análise do Desempenho de Concreto Betuminoso Usinado à Quente com Adição de Rejeito da Mineração do Cobre Segundo os Parâmetros Marshall

Analysis of Bituminous Concrete Performance Bituminous with Addition of Copper Mining According to Marshall Parameters

José Antônio Souza¹, João Mota Sousa², Ricardo Bentes Kato³

¹ Mestre em Engenharia Civil – UFSC, Doutorando do Programa de Doutorado em Engenharia de recursos Naturais da Amazônia – UFPA

² Mestre em Engenharia Civil, Doutorando do Programa de Doutorado em Engenharia de recursos Naturais da Amazônia – UFPA, Professor Titular do curso de Engenharia Civil – UFPA

³ Engenheiro Químico, Doutor em Engenharia – UFPA, Professor do Programa de Doutorado em Engenharia de recursos Naturais da Amazônia – UFPA

Recebido: 08/2015, aceito 09/2015, Publicado: 10/2015

Resumo: O presente artigo tem o objetivo de analisar o desempenho de material asfáltico (Concreto Betuminoso Usinado à Quente – CBUQ), quando adicionado rejeito da mineração do cobre em sua composição. Após caracterização dos materiais e dosagem pelo método Marshall foi-se gradativamente substituindo a areia do CBUQ pelo rejeito de cobre, notando-se uma melhora significativa em todos os parâmetros Marshall, principalmente na redução do teor de CAP, fato este devido às características granulométricas do rejeito, pois sua finura superior à areia utilizada possibilitou maior fechamento dos vazios na massa.

Palavras chaves: Asfalto, rejeito de cobre, meio ambiente

Abstract: This article aims to analyze the performance of asphaltic material (Bituminous Concrete), when added mining tailing soft copper in its composition. After characterization of materials and dosage by the Marshall method, there was gradually replacing CBUQ sand by copper tailings. A significant improvement in all parameters, primarily on reducing the dosage of CAP, due to the characteristics of the tailings size, because its fineness higher than the sand use deniable greater gaps in mass closures.

Keywords: Asphalt, copper tailings, environment.

INTRODUÇÃO

Preservar o meio ambiente é um desafio que persegue o homem desde os primórdios de sua existência. Extrair da natureza o máximo possível possibilitando a ela se recuperar é um processo complexo, sendo este o grande desafio, salvar a natureza para que também o homem possa se manter vivo.

A extração de metais surge com a evolução da humanidade e dos conflitos para confecção de armas e ferramentas, com o surgimento do capitalismo, principalmente em sua fase industrial, a demanda de grande quantidade de energia e crescimento das cidades, florestas foram desmatadas, animais foram extintos, bem como muitas culturas e raças.

O setor mineral é a base econômica de muitos países, seja pela quantidade de trabalhadores que o setor emprega, ou pela grande contribuição no produto interno bruto destes países. Sua importância se dá também

pelo efeito de sua cadeia produtiva com outros setores como: todo o setor siderúrgico e metalúrgico, alguns segmentos do setor energético, construção civil, construção naval, setor aeroespacial, entre outros.

Proporcionalmente a sua importância, a indústria metalúrgica é um setor que produz volumes consideráveis de resíduos sólidos inerentes aos seus processos produtivos. Com o aumento da preocupação ambiental as plantas de exploração foram sofrendo modificações como: filtros e estações de tratamento de efluentes. Porém, não impede a geração de resíduos que são basicamente escórias ou areias.

Geralmente esses resíduos apresentam-se sob a forma granular. Entre os resíduos dessa indústria, destacam-se a escória de cobre, escória de alto forno, escória de aciaria elétrica e a areia de fundição, visto que principalmente os três primeiros já são usados em obras públicas em alguns países desenvolvidos.

A produção nacional da indústria extrativista mineral registrou expansão de 9,57% no primeiro semestre de 2014, na comparação com o mesmo período do ano anterior, conforme o Índice de Produção Mineral (IPM). Foi o melhor desempenho do setor desde 2011. No que se refere à composição das exportações da I.E.M constata-se uma diminuição da participação do minério de ferro (77,7% ante 80,2%) e ouro (6,2% ante 7,4%) na pauta exportadora da I.E.M em detrimento de uma maior participação das substâncias cobre (4,6% ante 3,9%) e pedras naturais (3,0% ante 0,6%).

Em relação ao Valor da Produção Mineral (VPM) paraense em 2013, ela atingiu cerca de R\$ 27,3 bilhões, superando em 20,6% o total do Valor da Produção Mineral registrada em 2012. Como ocorreu em 2012, o principal produto da cesta que compõe o valor da produção mineral foi o minério de ferro, com mais de R\$ 21,6 bilhões. O concentrado de cobre em 2013 atingiu mais de R\$ 2,8 bilhões, valor que supera em 43,4% o registrado em 2012 e coloca o produto como o que alcançou maior crescimento percentual. O manganês com vendas de R\$ 561 milhões apresentou o segundo melhor desempenho percentual no período, dentre os produtos que compuseram a cesta para amostra. Mantiveram-se praticamente estáveis com crescimento relativo de 1,1% o caulim e a bauxita. O níquel apresentou a maior queda em 2013, 97,2% (DNPM, 2014).

Com exceção do alumínio, o cobre é o metal não ferroso mais utilizado pelo homem por ser um excelente condutor de eletricidade e calor. Seu processo de obtenção do produto final advém dos processos de extração, fundição e refino, gerando quatro tipos de produtos:

- Minério de cobre: corresponde ao mineral extraído da mina, cujo conteúdo oscila entre 0,7% e 2,5% de cobre;
- Concentrado de cobre: corresponde ao minério de cobre que, através de um processo de moagem das rochas e mistura

com água e reagentes, passa a apresentar entre 30% e 38% de cobre fino;

- Cobre fundido: corresponde aos concentrados que, por meio de processos irrometalúrgicos, se transformam no chamado cobre *blister* (98,5%) e, posteriormente, no anodo de cobre, cujo teor é de 99,7% de cobre;

- Cobre refinado: corresponde aos anodos e às soluções (no caso da lixiviação) questão refinados por processo de eletrólise, resultando nos catodos, com pureza de 99,9% de cobre.

As jazidas de cobre são geralmente de grandes dimensões e baixos teores. Nos depósitos de grande porte e lavra subterrânea, o teor de corte não deve ficar abaixo de 1% de Cu, e nos de pequeno porte, não deve ser inferior a 3%. Em lavra a céu aberto, o teor mínimo pode atingir 0,5 % de Cu. No Brasil o estado do Pará possui as maiores reservas de minério de cobre do Brasil, localizadas no distrito cuprífero de Carajás, em Marabá, no Estado do Pará, perfazendo uma quantidade total de 853.140.341 t. As reservas medidas somam 618.108.992 t, com teor médio de 0,93% de cobre, correspondendo a 5.767.411 t de cobre contido.

O processo de extração do cobre da natureza se dá geralmente à céu aberto, porém pode ser subterrâneo ou de forma mista. O teor metálico médio varia de 0,7% à 2,5%, sendo o solo submetido à britagem, moagem, flotação e secagem, obtendo-se o concentrado cujo teor de cobre contido já alcança 30%. Este material já concentrado é então aquecido em um forno *flash*, de onde sai o mate com teor de 45% a 60%, e este ao forno conversor de onde se obtêm o *blister* com 98,5% de cobre, podendo chegar até 99,9% se for ainda levado ao refino a forno. Este produto é levado a refusão, obtendo-se então o cobre no formato de tarugos ou placas. Dá-se então a trefilação destes tarugos, gerando as barras de cobre, perfis e tubos e através da laminação das placas, são produzidos as tiras, chapas e arames. Se, entretanto, ao invés da simples refusão o catodo for fundido e laminados em processo

contínuo obtêm-se o vergalhão, a partir do qual serão fabricados os fios e cabos.

Paralelamente a esta questão ambiental tem-se a importância do transporte para a sociedade, seja sua função econômica ou social. Em qualquer sociedade os transportes têm papel fundamental no desenvolvimento econômico, seja na movimentação de pessoas, seja no transporte de mercadorias, integrando regiões produtivas diferentes, seja no território nacional ou além das fronteiras do país. Analisando financeiramente o custo do transporte contribui positivamente ou negativamente no custo final do produto, por motivos como: o modal escolhido, as taxas cobradas pelo setor até as condições de infraestrutura oferecidas (CALABREZI, 2005).

A oferta de infraestrutura de transporte está intimamente ligada ao processo de desenvolvimento social e econômico, e deve fazer parte dos planos e objetivos de desenvolvimento de cada nação. Neste contexto supracitado encontra-se o modal rodoviário, onde no Brasil responde por cerca de 60% da matriz brasileira, por onde escoam a produção de bens e serviços (CNT, 2011).

O principal material utilizado em pavimentação das rodovias brasileira é o concreto betuminoso, que pode 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 (PATRIOTA 2004).

As misturas asfálticas têm 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 influência 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: Resistência ao deslizamento dos pneus dos veículos, tendo como principais influentes a distribuição granulométrica e o teor de ligante.

Os ligantes asfálticos são uns dos materiais mais antigos utilizados pela humanidade, onde estudos apontam para datas da ordem de 8.000 anos atrás com registro de utilização, onde os assírios já empregavam em seus palácios, empregou-se também o betume na torre de Babel, e relatos bíblicos apontam que Noé calafetou sua arca com esse material. Suas primeiras aplicações foram com argamassas, material para calafetagem de navios e impermeabilizantes. Como material de pavimentação registros datam o ano de 1829 em Lyon na França, utilizado para melhoria das condições de rodagem (MANUAL DO ASFALTO, 1989).

Os Materiais betuminosos são mais do que um único produto, e sim uma variada família de produtos oriunda de tratamentos específicos, onde se caracterizam por serem materiais aglutinantes de cor escura, constituídos de associações de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono. São subdivididos em duas categorias: os asfaltos e os alcatrões:

- Asfaltos: A palavra vem do grego e significa firme, estável, são obtidos através de destilação do petróleo. Podem ser obtidos em jazidas naturais ou provenientes da refinação do petróleo;
- Alcatrões: são obtidos através da refinação de alcatrões brutos, que por sua vez vêm da destilação de carvão mineral, possui uma sensibilidade a temperatura maior que o asfalto.

O alcatrão praticamente não é mais utilizado em pavimentação desde que se

determinou o seu poder cancerígeno. Além disso, apresenta pouca homogeneidade e baixa qualidade para ser utilizado como ligante em pavimentação.

Segundo Leite (1999), os principais materiais asfálticos utilizados em pavimentação são:

- Cimento asfáltico de petróleo (CAP);
- Asfaltos diluídos;
- Asfaltos Emulsionados;
- Asfaltos Oxidados;
- Asfaltos modificados.

Sendo os principais utilizados em pavimentação os CAPs, asfaltos diluídos e emulsionados. O teor de asfalto varia com a intensidade de tráfego, onde em vias de tráfego pesado o mesmo deve ser minimizado, com o intuito de evitar a exsudação provocada pela combinação da densificação da mistura e altas temperaturas (MUGAYAR, 2004).

Os CAPs são obtidos por processo de destilação ou encontrados em jazidas naturais, recebendo o nome de CAN (Cimento asfáltico Natural). São materiais semissólidos a temperatura ambiente, necessitando de aquecimento para adquirir consistência adequada para utilização, sendo constituídos por 90 a 99% de grandes cadeias de hidrocarbonetos e por 1 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre, e oferecem propriedades aglutinantes e impermeabilizantes (Leite, 1999).

O CAP é proveniente do produto final da destilação do petróleo cru, do qual frações mais leves (gasolina, querosene e diesel) são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação (IBP, 1999).

O cimento asfáltico pode ser considerado um material visco-elástico, pois

a temperaturas baixas pode ser considerado um comportamento elástico, e para altas temperaturas um comportamento viscoso, este comportamento se deve a suas características reológicas, onde as forças de ligações fracas entre os átomos deixa o material sensível a temperatura e ao cisalhamento.

Dentre as propriedades físicas mais importantes dos CAPs destacam-se a viscosidade, devido esta estar relacionada diretamente com a capacidade de bombeamento, facilidade de mistura e aplicação.

O agregado mineral utilizado em misturas betuminosas tem grande influência nas propriedades futuras da mesma, visto que ocupa entre 88% e 96% em peso e 75% do volume, e são responsáveis pela estrutura sólida que irá resistir às solicitações das cargas provenientes do tráfego.

A propriedade das misturas é afetada pela graduação dos agregados, relação de vazios, teor de asfalto e tipo de filler. Por exemplo, o aumento do tamanho do agregado causa profundas alterações nos ensaios de fluência, tração e resiliência da mistura, assim como na deformação permanente que é aumentada sua resistência, quando ensaiada com agregados maiores.

A textura e forma é outro fator preponderante para as características finais da mistura, visto que influencia diretamente da adesão do ligante à superfície do agregado.

Vasconcelos (2004) verificou que agregados bem distribuídos granulometricamente proporcionaram maior vida de fadiga ao pavimento, pela melhor compactação do promovida durante a execução do serviço de pavimentação.

Faixas granulométricas mais finas segundo a DNER-ES-031/06 provocam deformações menores do que, logo a faixa “C” possui desempenho melhor do que a “B” e a “A”, porém proporciona maior consumo de ligante, devido sua maior superfície específica para cobrir.

No cenário descrito acima se coloca o objetivo deste artigo como analisar o teor de

cimento asfáltico de petróleo ótimo quando adicionado rejeito da mineração do cobre ao concreto asfáltico usinado a quente. Para se atingir este objetivo será realizada a caracterização dos materiais, procedendo posteriormente à dosagem Marshall preconizada pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para se atingir o objetivo da presente pesquisa, será necessário inicialmente caracterizar os agregados utilizados na dosagem (seixo rolado de rio e areia de cava) e o rejeito de cobre segundo lista abaixo:

- Granulometria;
- Dimensão máxima do agregado;
- Módulo de finura;
- Massa específica;
- Equivalente de areia.

Para caracterização dos agregados foram utilizadas as seguintes normas (Tabela 1):

Tabela 1: Normas para caracterização dos agregados.

ENSAIO		NORMA
Dimensão Característica	Máx.	DNER-ME 083/98
Módulo de Finura		DNER-ME 083/98
Teor Pulverulento	Material	DNER-ME 266/97
Equivalente de Areia		DNER-ME 54/97
Massa Específica		DNER-ME 195/97 DNER-ME 84/95

Na pesquisa será utilizado CAP 50/70 conforme classificação do DNIT, e com o objetivo de caracterizar o CAP utilizado, assim como definir a temperatura de mistura e compactação será realizado os seguintes ensaios de caracterização do CAP.

- Penetração;
- Viscosidade Saybolt-Furol;
- Viscosidade Cinemática;
- Anel e bola;
- Adesividade ao agregado graúdo;

Com a caracterização executada será procedida à dosagem, dentro da curva “C” do DNIT, posteriormente moldados os 15 corpos de prova (3 para cada 5 teores de CAP). Dosados os corpos de prova serão realizados e calculados os parâmetros Marshall e definidos os teores de CAP ótimo. Após a dosagem piloto a areia será substituída gradativamente por rejeito de cobre até a mistura ser totalmente isenta de areia e substituída por cobre (Tabela 2).

Tabela 2 – Quantidade e teores de rejeito por corpo de prova da pesquisa.

DOSAGEM	QUANT. DE CP's
Piloto (75% de seixo + 25% areia)	15
10% Rejeito (75% de seixo + 15% areia + 10% de rejeito)	15
20% Rejeito (75% de seixo + 5% areia + 50% de rejeito)	15
25% Rejeito (75% de seixo + 25% de rejeito)	15
TOTAL DE CP's	60

Fonte: Dados da Pesquisa.

Após as dosagens serão analisados os parâmetros Marshall segundo Tabela a seguir Tabela 3 – Parâmetros Marshall.

PARÂMETROS MARSHALL	MÉTODO DE ENSAIO	CAMADA DE ROLAMENTO
Porcentagem de Vazios	DNER-ME 043	3 a 5
Relação Betume / Vazios	DNER-ME 043	75 - 82
Estabilidade Mínima (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500
Resistencia à Tração por Compressão Diametral Estática à 25°C, Mínima (Mpa)	DNER-ME 138	0,65

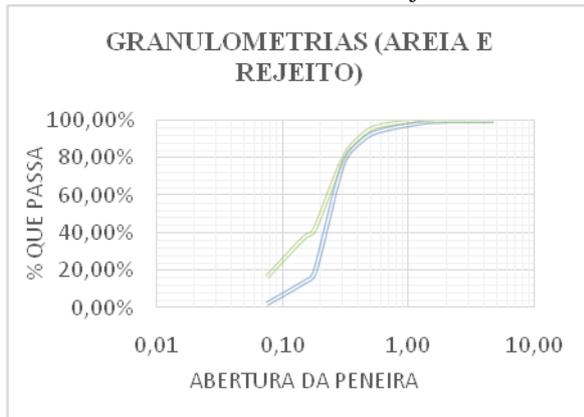
Fonte: DNIT031/2006 ES.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A areia é procedente da jazida de Nova Timboteua e caracterizou-se como uma areia fina, o seixo proveniente da jazida Ourém e também com um seixo fino. Já rejeito caracterizou-se como uma areia muito fina,

com um ponto atraente para a mistura asfáltica que foi o teor de material passante na peneira 200 com 16,07%, o que pode funcionar como fíler na massa asfáltica, visto que a areia em questão apresenta apenas 1,80% de material passante na peneira 200, conforme curvas granulométricas e Tabela de resumo dos resultados da caracterização a seguir (Gráficos 1 e 2 e Tabela 4):

Gráfico 1 – Granulometria Areia e Rejeito de cobre.



Fonte: Dados da pesquisa.

Gráfico 2 – Granulometria do Seixo.



Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4 – Resumo da caracterização dos agregados e rejeito.

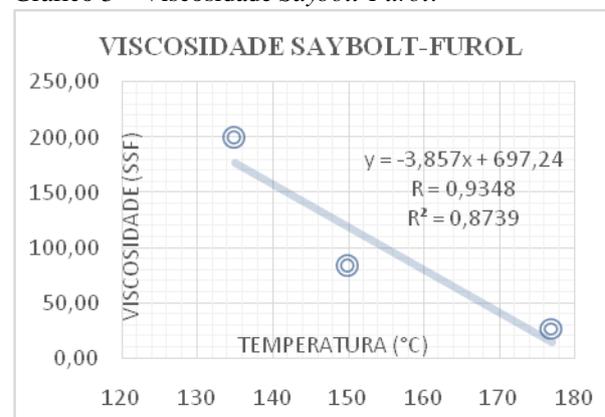
ENSAIO	SEIXO	AREIA	REJEITO
Dimensão Máx. Característica	19,10 mm	1,19 mm	0,59 mm
Módulo de Finura	1,18	0,31	0,24
Teor Material Pulverulento	0,70%	1,47%	9,72%
Equivalente de Areia	-	97,32%	75,68%
Massa Específica	2,499	2,644	2,861

Fonte: Dados da pesquisa.

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

Quanto ao CAP, o mesmo se enquadra em um CAP 50/70 segundo seus resultados de penetração. Foi também realizado ensaio Saybolt-Furol para determinação da temperatura de dosagem e compactação, ficando definido a temperatura de mistura de 141,88° C à 161,33° C e temperatura de compactação de 140,59° C à 148,36° C, conforme Gráfico 3:

Gráfico 3 – Viscosidade Saybolt-Furol.

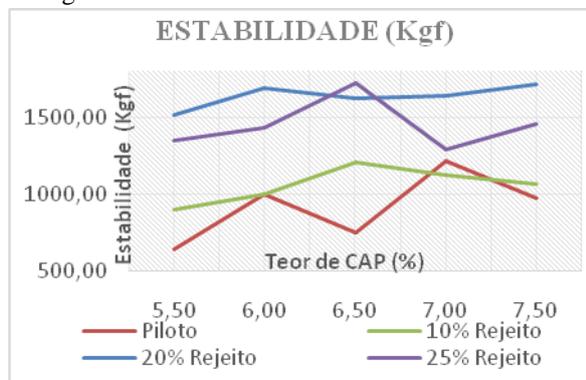


Fonte: Dados da pesquisa.

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

O primeiro parâmetro analisado foi a estabilidade onde todos os corpos de prova rompidos apresentaram estabilidade superiores a 500 Kgf, o mínimo preconizado pela norma DNIT 031/2006. Além de atingir o mínimo exigido por norma, os dados mostram uma clara tendência crescimento da estabilidade com a adição do rejeito. Este efeito se deve a presença do matéria com ação de filler no rejeito, preenchendo os vazios da massa aumentando então a resistência da mistura (Gráfico 4).

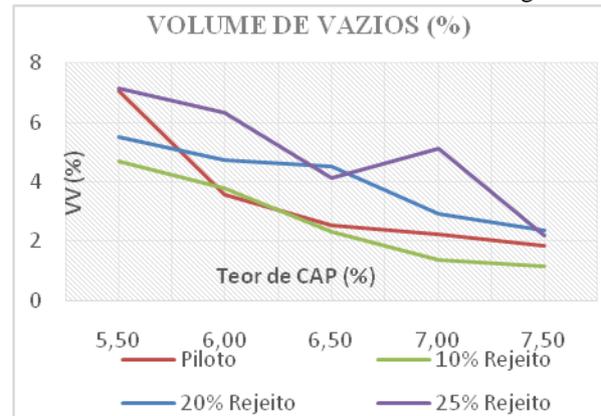
Gráfico 4 – Estabilidade Marshall Média das Dosagens.



Fonte: Dados da pesquisa.

Quanto ao volume de vazio a norma do 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 Gráfico 5. Isso se deve ao fechamento da massa provocada pela granulometria dos componentes da mistura

Gráfico 5 – Volume de Vazios Médio das Dosagens.

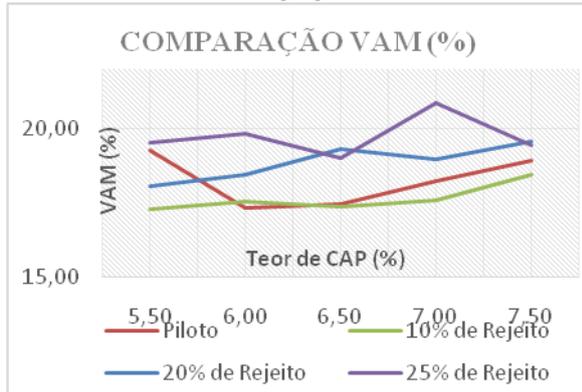


Fonte: Dados da pesquisa.

O próximo gráfico corrobora com o resultado anterior, onde a distribuição granulométrica demonstra que a composição de 10% de rejeito apresenta a menor relação de vazios deixados pelos agregados minerais. O vazio do agregado mineral é o volume de vazios da massa compacta considerando apenas os agregados, logo é o volume preenchido pela ligante adicionado aos vazios da mistura. Logo, se pode concluir que se o vazio preenchido pelo asfalto for muito baixo pode comprometer a durabilidade do pavimento, pois a película asfáltica em torno do agregado é quem determina a durabilidade do pavimento visto que permite a oxidação mais rápida do asfalto permitindo a penetração de água na mistura. Se o vazio preenchido pelo ligante for muito alto prejudicaria a estabilidade e se tornará economicamente inviável. Um vazio de agregado mineral dentro de parâmetros aceitáveis também permite a expansão térmica do asfalto.

A norma do DNIT 031/2006 relaciona o VAM com a dimensão máxima do agregado graúdo, sendo o mínimo para a mistura pesquisa é de 15%, onde pode ser notado no Gráfico 6 que todas as misturas atenderam o exigido pela norma, mas a mistura com 10% de rejeito também o melhor desempenho.

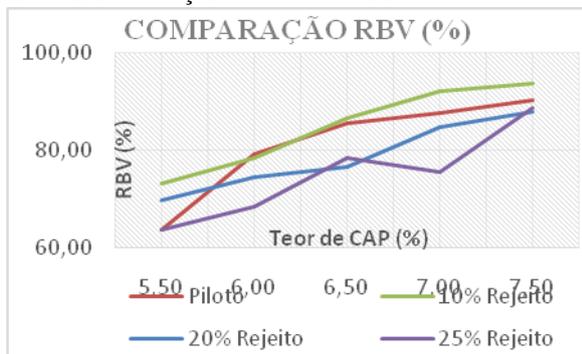
Gráfico 6 – Vazios dos Agregados Mineral Médio.



Fonte: Dados da pesquisa.

A relação betume vazios (Gráfico 7) é outro parâmetro importante a ser analisado onde a norma do DNIT 031/2006 para camada de rolamento é de 75 à 82%, este parâmetro será importante no momento de definir o teor ótimo de CAP, porém novamente o teor de 10% de rejeito aparece como o de melhor desempenho das misturas estudadas.

Gráfico 7 – Relação Betume Vazios.

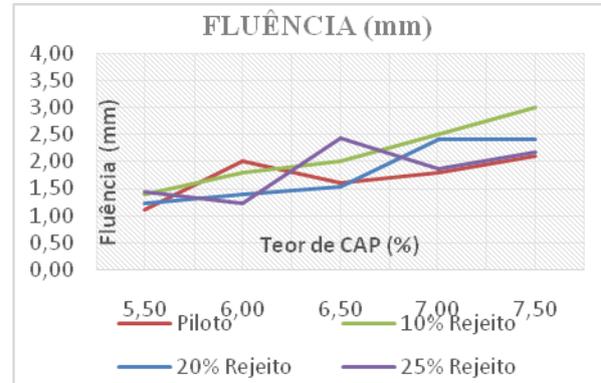


Fonte: Dados da pesquisa.

A fluência é a deformação vertical máxima de um corpo de prova medida desde a aplicação da carga até o momento em que a estabilidade começa a cair, logo altos valores de fluência indicam uma mistura plástica, o que acarretará deformações permanentes, porém, baixos valores ocorrem em misturas com teor de vazios abaixo do especificado e teor de asfalto insuficiente, logo acarretará um asfalto frágil (quebradiço) prejudicando a durabilidade do pavimento. Como se pode notar novamente a mistura com 10% de rejeito obteve o melhor desempenho e função

de uma distribuição granulométrica mais dosada, conforme Gráfico 8.

Gráfico 8 – Fluência Média das Dosagens.

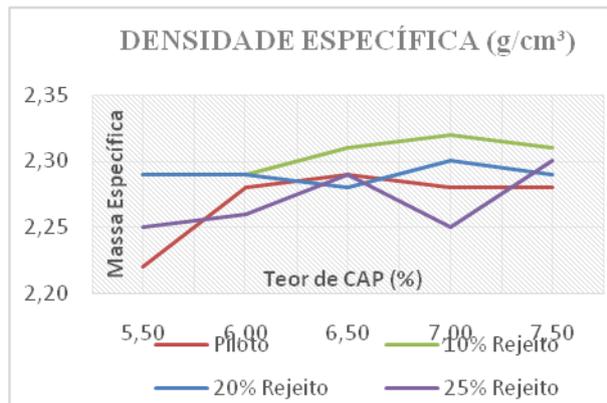


Fonte: Dados da pesquisa.

Normalmente aumenta-se a densidade aparente com o aumento do teor de ligante até determinado valor ocasionado pela lubrificação das partículas do agregado que para um mesmo esforço de compactação elas se tornam mais próximas, a partir daí se forma uma camada espessa em torno do agregado o que os torna mais afastados, diminuindo a densidade. Este valor de laboratório, chamada de densidade ótima, é comparado com a do pavimento e pode ser melhorado com o aumento do teor de filler, aumento do teor de asfalto ou qualquer método que reduza os vazios da mistura.

Para a obtenção dos valores de densidade aparente da mistura betuminosa foi utilizado à norma DNER-ME- 117/94, onde novamente a mistura com 10% de rejeito apresenta a maior densidade específica, caracterizado pelo melhor fechamento dos vazios proporcionado pelo rejeito.

Gráfico 9 – Densidade Específica Média dos Corpos de Prova.



Fonte: Dados da pesquisa.

Após os parâmetros Marshall calculados, foi definido o teor de vazios de 4% como alvo da mistura, e checado se os outros parâmetros são atendidos pelo teor de CAP relacionado a este teor de vazios. Logo atingido os parâmetros de projeto, ficou definido os teores ótimos conforme Tabela a seguir:

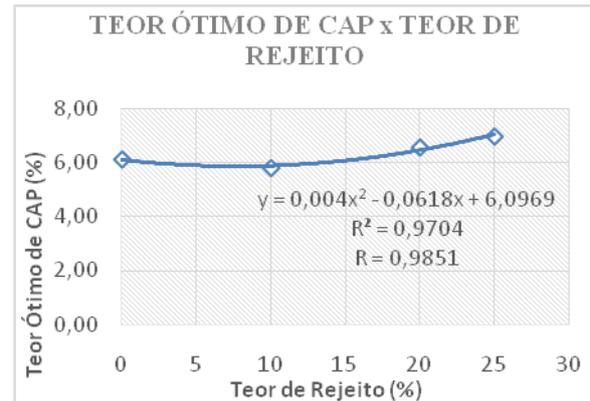
Tabela 5 – Teor Ótimo de CAP.

Teor de Rejeito (%)	Teor Ótimo (%)
0	6,12
10	5,80
20	6,57
25	6,98

Fonte: Dados da pesquisa.

Como pode ser notado também no Gráfico 10 o teor de CAP tende a diminuir quando se acrescenta o rejeito, isso se explica pelo fechamento melhor dos vazios, devido suas características granulométricas. Esta tendência não se mantém ao se acrescentar mais rejeito, pois há o aumento da superfície específica a ser coberta pelo CAP, não compensada pela redução dos vazios. Pode ser notada também a alta correlação entre as variáveis estudadas, assim como uma tendência de segundo grau para a equação de regressão, o que corrobora com a análise realizada.

Gráfico 10 – Teor Ótimo de CAP.



Fonte: Dados da pesquisa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme pôde se observar o rejeito da mineração do cobre 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.

Este benefício supracitado é notado até a dosagem de 10%, ou mais precisamente de 8% de rejeito, a partir deste valor o efeito de sua superfície específica maior exige maior teor de CAP.

Outro ponto positivo foi a redução da relação betume vazio e da porcentagem de vazios da massa asfáltica, ponto este crucial na durabilidade do pavimento, pois dificulta a entrada de agentes agressivos.

Logo se conclui que a adição de rejeito na mistura asfáltica traz três benefícios imediatos:

- Benefício Tecnológico: redução do teor de vazios;
- Benefício Ambiental: Consumo do rejeito gerado pela mineração;
- Benefício econômico: redução do teor de CAP nas misturas asfálticas.

REFERÊNCIAS

CALABREZI, S. R. **A multimodalidade para o transporte de cargas: identificação de problemas em terminais visando à integração dos modais aéreo e rodoviário.** Campinas, 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2005.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (1997). **ME - 54/97:** Agregados – Equivalente de Areia. Rio de Janeiro.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (1994). **ME - 117/94.** Misturas Betuminosas – Determinação da Densidade Aparente.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Informe Mineral.** Janeiro/Julho 2014. Brasília.

IBP. **Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos.** 7ª Edição. IBP/Comissão do asfalto. Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L.F.M. Estudo de preparo e caracterização por polímeros. **Tese de Doutorado.** COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

MUGAYAR, André Naletto. 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.** São Carlos, SP. 2004.

MANUAL DO ASFALTO. **Instituto do Asfalto.** Série N° 04(MS-4), 1989.

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

PILATI, Fernanda. Análise do efeito da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas. **Dissertação de Mestrado.** USP – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2008.