PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Graduação em Engenharia Civil

Caio César Marques Nogueira
Carlos Magno de Almeida Rosa
Lucas Augusto Marriel Procópio
Lucas Felipe Amaral de Paula
Marconny Silva dos Santos
Mateus Portugal Figueiredo
Yuri Gandra Dias

Estudo da adição do aditivo de CBUQ aplicado a frio – CAF, para uso em agregado artificial e asfalto modificado com polímero

Belo Horizonte

2018

Caio César Marques Nogueira
Carlos Magno de Almeida Rosa
Lucas Augusto Marriel Procópio
Lucas Felipe Amaral de Paula
Marconny Silva dos Santos
Mateus Portugal Figueiredo
Yuri Gandra Dias

Estudo da adição do aditivo de CBUQ aplicado a frio – CAF, para uso em agregado artificial e asfalto modificado com polímero

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Getúlio Francisco Manoel.

Belo Horizonte
2018

Caio César Marques Nogueira
Carlos Magno de Almeida Rosa
Lucas Augusto Marriel Procópio
Lucas Felipe Amaral de Paula
Marconny Silva dos Santos
Mateus Portugal Figueiredo
Yuri Gandra Dias

Estudo da adição do aditivo de CBUQ aplicado a frio – CAF, para uso em agregado artificial e asfalto modificado com polímero

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Getúlio Francisco Manoel.

Prof. Dr. Getúlio Francisco Manoel (Orientador)

Prof. Dr. Manoel Robério Ferreira Fernandes (Examinador)

Prof. Me. Walter Duarte Costa Filho (Examinador)

Belo Horizonte, 05 de dezembro de 2018.

Resumo

O presente trabalho avalia as alterações de propriedades do cimento asfáltico de petróleo (CAP), envolvendo a sua modificação pelos polímeros de acetato de vinila (EVA), estireno-butadieno-estireno (SBS), elastômero termoplástico (TPE), pó de pneu e polietileno de baixa densidade (PEBD) com o objetivo de produzir misturas asfálticas usinadas a quente para aplicação a frio – CAF, com o uso de aditivo e agregados de mineração. Para atingir esse objetivo, foram apresentados os resultados dos ensaios de viscosidade Brookfield, destilação do aditivo para aplicação do CAF, granulometria, equivalente areia, determinação da abrasão Los Angeles, adesividade e Marshall a quente e a frio. Considerando os resultados obtidos, a produção de CBUQ utilizando agregado de mineração da USIMINAS com base o ensaio de estabilidade Marshall se mostrou viável e apresentou resistência acima dos limites mínimos estabelecidos pelo DNIT.

Abstract

The present work evaluates the alterations of properties of Petroleum Asphalt Cement, involving its modification with addition of the polymers: Vinyl Acetate (EVA), Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), Thermoplastic Elastomer (TPE), Tire Powder and Low-Density Polyethylene (LDPE) in order to produce hot machined asphalt mixtures, that will be cold-applied - CAF, with the use of additives and aggregates from mining. To achieve this objective, the following tests were done and their respective results: Brookfield Viscosity Test, Additive Distillation, Granulometry, Sand Equivalent, “Los Angeles” Abrasion Determination, Test of adhesiviity, and Marshall Stability Test for both applications, hot and cold. Considering the results obtained, the production of Bituminous Concrete Hot Machined using USIMINAS mining aggregate, based on the Marshall stability test proved to be viable, showing resistance above the minimum limits established by DNIT.

LISTA DE SIGLAS

ADF	Aditivo para CBUQ aplicado a frio
ADP	Asfalto diluído de petróleo
AMP	Asfalto modificado por polímeros
ANP	Agência Nacional do Petróleo
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society of Testing and Materials
CAF	Concreto asfáltico usinado a quente aplicado a frio
CAFR	Concreto asfáltico reciclado usinado a quente aplicado a frio
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Cimento betuminoso usinado a quente
CP	Corpo de prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EA	Emulsão asfáltica

Índice de Tabelas

Tabela 1: Características do asfalto modificado com polímero SBS – valores máximos e mínimos 22
Tabela 2: Especificações de AMB - Asfaltos Borracha 26
Tabela 3: Propriedades de alguns polietilenos..... 27
Tabela 4: Benefícios de modificadores de asfalto (Shell, 2003)..... 28
Tabela 5: Parâmetros de solubilidade de Hildebrand..... 32
Tabela 6: Composição das misturas de CAP com polímeros 35
Tabela 7: Graduação para ensaio..... 40
Tabela 8: Carga Abrasiva..... 40
Tabela 9 – Faixa Granulométrica de Ensaio Marshall..... 42
Tabela 10: Referência Marshall para dosagem do teor de ligante 43
Tabela 11: Resultado Ensaio Viscosidade Brookfield – CAP puro..... 45
Tabela 12: Dados do ensaio de granulometria..... 46
Tabela 13: Referência de resultados do ensaio de granulometria 47
Tabela 14: Resulado do ensaio de equivalente de areia..... 49
Tabela 15: Valores de referência do equivalente de areia 49
Tabela 16: Ensaio Marshall- Amostras sem polímeros e sem aditivo 53
Tabela 17: Percentual de adição por peneira ao agregado de mineração 54
Tabela 18: Resultado do ensaio Marshall; amostras com polímeros 54
Tabela 19: Especificações de resultados – Ensaio Marshall – a quente..... 55
Tabela 20: Especificações de resultados – Ensaio Marshall – pré misturado a frio 56
Tabela 21: Especificação PMF..... 56

Índice de Figuras

Figura 1: Aplicação do Rejeito de Minério 12
Figura 2: Esquema de objetivos do trabalho 15
Figura 3: Conformação Planar das moléculas de EVA 20
Figura 4: Estrutura Molecular do SBS 21
Figura 5: Microestrutura TPE-S 23
Figura 6: Tipos de estruturas poliméricas 24
Figura 7: Representação da estrutura do PEBD 26
Figura 8: Número de ramificações dos polietilenos 27
Figura 9: Misturador utilizado no processo de produção do AMP 35
Figura 10: Esquema dos equipamentos no ensaio de Viscosidade Brookfield 37
Figura 11: Granulometria da fração de agregados 46
Figura 12: Aspecto final do agregado após ensaio de adesividade 52
Figura 13: Gráfico VV e RBV com o teor de CAP 53

Sumário

Resumo 4
1 Introdução 10
1.1 Justificativa 13
1.2 Objetivos 14
1.3 Metodologia do trabalho 15
2 Revisão Bibliográfica 16
2.1 Definição de CAP 16
2.2 Definição de Agregados 16
2.2.1 Agregados Artificiais 17
2.2.2 Rejeitos de Mineração 17
2.2.3 Caracterização do agregado de mineração 18
2.2.4 Caracterização do Aditivo AMINOCAP WM 18
2.3 Definição de Polímero 19
2.3.1 EVA – Copolímeros de etileno e acetato de vinila 20
2.3.2 SBS - Estireno-Butadieno-Estireno 21
2.3.3 Elastômero Termoplástico - TPE 23
2.3.4 Pó de pneu 24
2.3.5 Polietileno de Baixa Densidade - PEBD 26
2.4 Definição do CAF 28
2.5 Asfalto modificado por polímero 28
2.5.1 Compatibilidade CAP – polímero 30
3 Metodologia de pesquisa 34
3.1 Preparação do corpo de prova – AMP 34
3.2 Modo de incorporação 34
3.3 Ensaios de referência: 36
3.3.1 Viscosidade Brookfield 36
3.3.2 Ensaio do Equivalente de Areia 37

3.3.3 Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles” 39
3.3.4 Ensaio de Adesividade 41
3.3.5 Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall a frio 41
4 Resultados e discussões 45
4.1 Resultado da Viscosidade Brookfield 45
4.2 Resultado da destilação do aditivo para aplicação do CAF 45
4.3 Resultado da Granulometria 46
4.4 Resultado do Ensaio Equivalente de Areia 48
4.5 Resultado do ensaio de abrasão “Los Angeles” 50
4.6 Resultado do ensaio de adesividade 51
4.7 Resultados Ensaio Marshall - amostra sem polímeros (a quente) 52
4.8 Resultados Ensaio Marshall Amostra CAFM 53
4.8.1 Valores de referência das misturas quentes e frias. 55
5 Conclusão 58
6 Referências Bibliográficas: 60

1 Introdução

O asfalto é um material de cor escura e consistência sólida ou semissólida, composto de hidrocarbonetos pesados que agem como elemento aglutinador, denominados asfaltenos e maltenos. Na fração de maltenos apresentam estruturas de saturados, resinas e aromáticos. É obtido em estado natural ou por diferentes processos físicos ou químicos, com seus derivados de consistência variável e poder aglutinante e impermeabilizante (ANP). Genericamente, quando se refere aos asfaltos estão incluídos uma série de derivados do petróleo, como cimentos asfálticos, asfaltos diluídos, emulsões asfálticas e asfaltos modificados. A principal aplicação dos compostos asfálticos é a pavimentação.

Segundo a NBR 7208 (1982), betume é uma mistura de hidrocarbonetos de consistência sólida, líquida ou gasosa, de origem natural ou pirogênica, completamente solúvel em bissulfeto de carbono (CS2), frequentemente acompanhado de seus derivados não metálicos. Segundo Rowe et al (1995), um asfalto modificado por polímero apresenta características diferentes em relação ao asfalto convencional, particularmente com relação à sua recuperação elástica a elevadas temperaturas. Segundo Corbett e Petrovski (1978), as propriedades do cimento asfáltico podem ser relacionadas com essas frações. Os saturados agem no sentido de influenciar negativamente a susceptibilidade térmica, os aromáticos contribuem para a melhoria de propriedades físicas, as resinas melhoram a ductibilidade e dispersão dos asfaltenos e os asfaltenos contribuem aumentando a viscosidade e tornando os cimentos asfálticos menos susceptíveis a variações de temperatura.

Segundo Gonzalez et al (2004) e Gusmão (2009), a adição de polímeros junto ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) confere maior estabilidade e elasticidade ao pavimento. Tal adição implica em uma redução da susceptibilidade térmica, tornando o material menos variável mediante a variação climática, colaborando assim, para um aumento da vida útil do pavimento. Segundo Bernucci et al (2010), os materiais de partida (monômeros), os tipos de reações utilizadas nas suas obtenções e as técnicas de preparação influenciam no comportamento do polímero sintético.

Para Leite (1999), os polímeros são classificados conforme o seu comportamento quando submetido a variações térmicas.

Quanto aos agregados utilizados no trabalho, visando à diminuição do impacto ambiental dos rejeitos de mineração e a aplicação deles no processo de pavimentação, deve-se considerar que esses rejeitos finos contêm altos teores de Sílica e Alumina e baixo teor de Ferro, não podendo ser reaproveitado em outras operações de beneficiamento de minério. Devido a esse não reaproveitamento, os rejeitos podem ser dispostos em barragens de contenção. Todavia, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal n° 12.305/10, as barragens de rejeitos não podem ser consideradas como uma solução ambiental.

No cenário das indústrias, bem como nas mineradoras, químicas, metalúrgicas, dentre outras, há uma grande quantidade de descarte de resíduos no meio ambiente, que por sua vez não é capaz de absorver estes minerais e metais. Como consequência, ocorre uma degradação significativa do meio físico, desrespeitando as necessidades de toda a população.

Dessa maneira, o reaproveitamento desse rejeito faz-se necessário, e a Política Mineral Brasileira tem buscado consolidar a mineração no contexto do desenvolvimento sustentável, incentivando práticas que beneficiariam e proporcionariam a conservação de um meio ambiente saudável, conforme Moreira (2002), sobretudo para gerações futuras. Além disso, segundo Menezes (2009), o aproveitamento de resíduos pode trazer também vantagens econômicas para as indústrias, uma vez que também poderia gerar emprego e renda para esta área.

É importante destacar que com isso há um estímulo de novos negócios na comunidade impactada pela atividade mineradora, o que gera produtos que melhorariam a infraestrutura regional.

A Figura 1 ilustra as possíveis formas de reutilização dos rejeitos de mineração no mercado atual.

Figura 1: Aplicação do Rejeito de Minério

Fonte: Samarco, acesso em 2018.

Para ilustrar como seria a utilização, os rejeitos da concentração de minério de ferro possuem granulometria baixa (até 19mm), logo, isso facilita a substituição desse material na massa cerâmica, uma vez que as argilas usadas como matéria-prima na indústria cerâmica tradicional apresentam baixa granulometria também, devido aos óxidos, como SiO_2 (silício), Al_2O_3 (alumínio) e Fe_2O_3 (ferro). Dessa maneira, é importante observar a granulometria da matéria-prima, pois interferem em propriedades, como taxas de sinterização, porosidade final, densidade e plasticidade da massa. Para que se consiga uma granulometria baixa, o que vai interferir é a operação de moagem, que por sua vez, elevam os custos de produção. Logo, uma matéria-prima com partículas finas teria um custo maior (Pureza et al, 2007).

Um exemplo da utilização de resíduos de mineração de ferro como material alternativo foi o que Saraiva (2006) realizou na construção de um trecho experimental rodoviário na cidade de Itabira, Minas Gerais. Ele fez uma análise do comportamento geotécnico dos solos argilosos misturados aos rejeitos de minério de ferro. Esses eram os materiais da camada de base, em combinação com geossintéticos. Com isso, os resultados apontaram para a viabilidade da utilização de rejeito de minério de ferro na composição de misturas para pavimentos tanto rodoviários quanto ferroviários.

A opção pela utilização de asfaltos modificados se faz necessária pela nítida percepção da inadequação dos cimentos asfálticos convencionais em proporcionar misturas asfálticas resistentes ao volume de carga transportada em rodovias de médio e alto tráfego. O desafio do volume de tráfego crescente e até

mesmo com excesso de carga por eixo vem ocasionando ruptura prematura dos revestimentos asfálticos tanto por fadiga, quanto por deformação permanente.

Para que a modificação do ligante seja viável técnica e economicamente, é necessário que o polímero e o agregado escolhido sejam resistentes à degradação nas temperaturas usuais de utilização do asfalto, misturem-se adequadamente com o asfalto, melhorem as características de fluidez do asfalto a altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para a mistura e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço a baixas temperaturas.

1.1 Justificativa

O trabalho se justifica por buscar um tema muito pouco abordado na literatura científica na área de pavimentação asfáltica, que é a produção de CBUQ aplicado a frio - CAF, em especial, utilizando também agregado e mineraçãoe asfaltos modificados por polímeros. Apesar de existir a comercialização do CAF, ainda há uma escassez de publicações e teses sobre o tema. Além disso, o trabalho tem o intuito de propor uma maior reciclagem de resíduos e utilizá-los como agregado em misturas asfálticas, propiciando também uma significativa contribuição ambiental.

Tendo em vista as novas tecnologias disponíveis no mercado, assim como o incentivo a adoção e desenvolvimento de prática sustentável, busca-se a compatibilização entre estes, visando um produto que seja capaz de atender sua demanda, sem comprometer sua qualidade, eficiência e custo, ao mesmo passo que, sua produção não afete a integridade dos recursos ambientais. Deste modo, o setor da pavimentação vem investindo na fabricação do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) com aplicação a frio - CAF, através da adição de aditivos que possibilitam a sua estocagem e aplicação a frio, principalmente em pequenas quantidades.

Para suprir o enfoque ambiental, propõe-se a utilização de resíduos gerados pela indústria mineradora, provenientes da extração de minério de ferro, na substituição do agregado graúdo (brita).

Os benefícios do uso do minério como agregado poderiam ser listados como:

- Possibilidade de armazenamento e facilidade no transporte e na aplicação;

- Redução dos custos provenientes da aquisição do agregado graúdo, uma vez que os resíduos da indústria de mineração são mais baratos que a exploração mineral de matérias primas;
- Redução de passivos gerados pela indústria de mineração, tornando-a mais sustentável;

Em relação à produção de CBUQ aplicado a frio - CAF, pode-se citar como benefícios:

- Dispensa a realização de imprimação e pintura de ligação
- Sua aplicação pode ser realizada em contato com água, ao contrário do asfalto convencional, cujo resfriamento provocado no contato com esta provoca a redução de sua resistência e aderência;
- Sua compactação pode ser realizada pelo tráfego;
- Possibilidade de ser estocado por longos períodos, podendo atingir até 2 anos.

Da união destes dois benefícios surge uma oportunidade de estudo e de utilização do material de aciaria junto com o CAF.

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivos propostos:

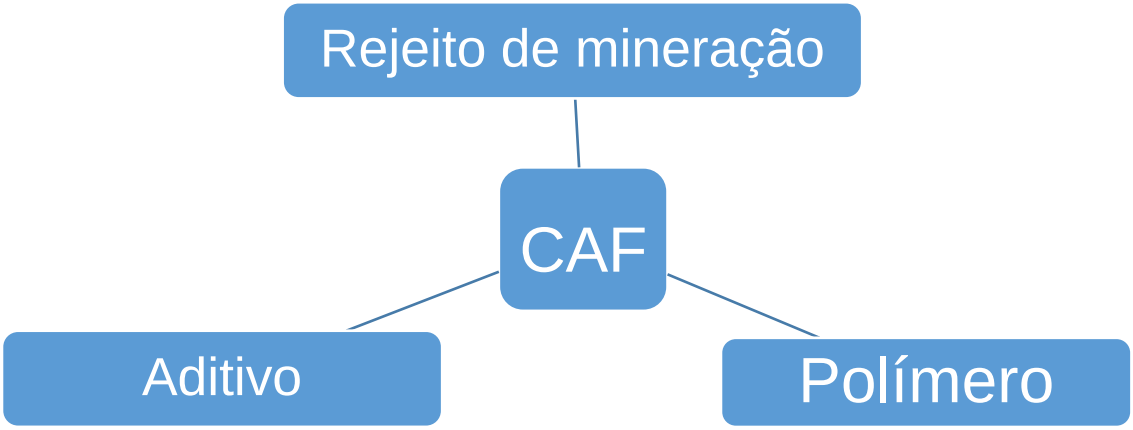
- Objetivo geral:

Produzir misturas asfálticas usinadas a quente para aplicação a frio (CAF), com o uso de aditivo e agregados de mineração.

- Objetivos específicos:

a) Estudar a compatibilidade do agregado de mineração com o aditivo do CAF em 20% para utilização em operação tapa buraco;
b) Estudar o aditivo do CAF na composição de asfalto modificado por polímeros nas concentrações mais usadas comercialmente: SBS 2,0%, EVA 4,0%, pó de pneu 16%, TPE 1,8% e PEBD 3,5%.
c) Reaproveitar o agregado de mineração descartado e inutilizado – formado por rejeitos - (passivo ambiental) na pavimentação asfáltica.

Figura 2: Esquema de objetivos do trabalho



Fonte: Autores Próprios, 2018.

1.3 Metodologia do trabalho

Este trabalho está dividido em quatro capítulos. No capítulo 1, é apresentada uma breve introdução explicitando da utilização de passivos de agregados artificiais, a necessidade de melhorar as condições dos pavimentos e os objetivos deste trabalho. No capítulo 2 é feita uma Revisão Bibliográfica, que inclui a base conceitual sobre polímeros, asfaltos modificados, agregados especiais e os aditivos. No capítulo 3, será descrita a metodologia utilizada para atender aos objetivos propostos, a preparação das amostras e os ensaios a serem realizados. No capítulo 4 será apresentado os resultados adquiridos através dos ensaios e, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho. Por último, no capítulo 6 são fornecidas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

O estado da arte na pavimentação passa pelo reaproveitamento de materiais de diversos segmentos, incluindo a atividade de mineração, uma vez que o volume de rejeitos é muito elevado. Igualmente a pavimentação também movimentos volumes consideráveis de materiais na construção do pavimento rodoviário.

2.1 Definição de CAP

Segundo Bernucci et al (2010) apud Manoel, 2015, no Brasil, CAP é a definição dada ao ligante betuminoso resultante de processos da destilação do petróleo de propriedade termoviscoplástico, pouco reativo e impermeável à água. Esse produto se encontra líquido em altas temperaturas, visco elástico à temperatura ambiente e semissólido às baixas temperaturas. Apesar da baixa reatividade química a muitos agentes esse material ainda pode sofrer oxidação de maneira lenta pelo contato com o ar e a água levando assim a um processo de envelhecimento. O CAP é classificado de acordo com o enquadramento do valor da sua penetração em mm estabelecida em teste 30/45; 50/70; 85/100; 150/200 (mm).

2.2 Definição de Agregados

A NBR 9935/2005 define a terminologia dos agregados como um material que não possui forma ou volume definido, sendo geralmente inerte, de dimensões e propriedades compatíveis para produção de argamassas e de concreto. Já para a utilização de agregados em misturas asfálticas os agregados podem ser classificados quanto à sua natureza, tamanho e graduação. (DNIT 2006- RJ).

Em relação a sua natureza os agregados podem ser naturais ou artificiais. Todos aqueles materiais que são constituídos de grãos derivados da alteração das rochas por processo de intemperismo ou britagem podem ser chamados de naturais. Enquanto os artificiais são produtos processos industriais que transformam a estrutura físico-química do material. (DNIT 2006- RJ).

De acordo com o DNIT 031/2004 – ES, os agregados podem receber três tipos de denominações quanto ao seu tamanho:

a) Graúdo: todo material retido na peneira nº 10 (2,0 mm). Como por exemplo, britas, cascalhos e seixos. (DNIT 2006- RJ).
b) Miúdo: material que passa que passa na peneira nº 10 (2,00 mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,075 mm). São eles, por exemplo, areia e pó de pedra (DNIT 2006- RJ).
c) Agregado de enchimento ou filler: corresponde ao material que passa pelo menos 65% na peneira nº 200 (0,075 mm), são exemplos desse tipo de agregado: cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé, etc.;

2.2.1 Agregados Artificiais

Estes são caracterizados como os resíduos provenientes de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, indústria de extração de atividade de mineração ou fabricados com uma finalidade única, o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada (Cabral, 2005) e a argila expandida. O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria siderúrgica e mineradora (Bernucci et al., 2010).

2.2.2 Rejeitos de Mineração

Existe uma crescente utilização de agregados de rejeito de mineração na pavimentação por conta das novas questões ambientais cada vez mais severas com relação a barragens de rejeitos.

De acordo com a ANBT NBR 13028, referente à elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, o rejeito é caracterizado como qualquer tipo de material gerado durante o processo de beneficiamento do minério, que não pode ser aproveitado com objetivo econômico.
Este conceito de rejeito difere-se do conceito do estéril, que a NBR 13029/2006 caracteriza como o material não aproveitável economicamente, cuja remoção é necessária e obrigatória para a lavra do minério.
Durante o processo de mineração ocorre a geração de resíduos caracterizados pela existência dos resíduos sólidos de extração, denominados estéril, e o rejeito como sendo os resíduos diretos do beneficiamento (IBRAM, 2011). Dependendo do tipo de minério utilizado para o processamento e dos tratamentos empregados, os rejeitos podem apresentar características

geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas diferentes. Em relação à granulometria, os rejeitos podem se classificar em dois tipos; rejeitos finos, denominados de lama, cujos tamanhos médios estão compreendidos entre 10µm e 100µm, e os rejeitos granulares, que são aqueles que apresentam granulometria grossa, acima de 0.074mm (Perozzo et al, 2017).

2.2.3 Caracterização do agregado de mineração

Os agregados a serem utilizados são do processo de mineração da USIMINAS, na fração denominada rejeito ou agregado de mineração e fração de lama de mineração. A escolha do tipo de material se deu em função da disponibilidade do mesmo e em função do vislumbre de utilização de passivos gerados na indústria de mineração.

> *"A amostragem se dará da seguinte maneira: o rejeito de flotação vem do overflow da Rougher e da Scavenger, a lama advinda do underflow do espessador de lama e pelo rejeitoduto, sendo possível obter estes constituintes juntos em uma única saída na linha de operação. As amostras serão retiradas da seguinte maneira: uma porção de lama e outra de rejeito de flotação serão coletados todo dia em horários definidos pelos operadores da área. Essa amostra passará pelo filtro prensa da Andritz. Obter-se-á assim, uma torta filtrada que facilitará o seu manuseio para as práticas que serão desenvolvidas pelo grupo."* Oliveira at al, 2018.

Estes materiais foram doados pela USIMINAS para os trabalhos de pesquisa na PUC Minas.

2.2.4 Caracterização do Aditivo AMINOCAP WM

Neste trabalho será utilizado um aditivo produzido pela empresa Aminocap Adcap WM para a produção de misturas betuminosas modificados por polímero. Este aditivo possui a propriedade de possibilitar a produção do concreto betuminoso usinado a quente e posterirormente resfriado, ensacado e aplicado a frio, a que chamamos de CAF.

A dosagem deste aditivo recomendada é de 10 a 20% em massa do CAP. Neste trabalho é fixado o valor de referência de 20%, conforme estudos anteriores (Pereira, at al, 2018). O aditivo possui cor marrom claro, ponto de fulgor acima

de 170°C, consistência líquida a 25°C, cheiro adocicado característico, pH de 7,43, densidade de 0,89 g/ml e é fornecido em tambores metálicos de 200 litros ou IBCs plásticos com 1000 litros.

A recomendação do fabricante que que o aditivo seja adicionado ao CAP em temperaturas próximas a 130º C antes da produção do CAF, que deve ocorrer em temperaturas próximas a 140º C.

Neste trabalho o aditivo Adcap WM será adicionado a um CAP modificado por polímero, e posteriormente produzir o CAP modificado.

Esse aditivo foi gentilmente doado para a PUC Minas pela AMINOCAP para os trabalhos de pesquisa.

2.3 Definição de Polímero

O termo polímero foi criado por Berzelius, em 1832, para designar compostos de pesos moleculares múltiplos, pois o termo isômero já era utilizado para designar compostos de mesmo peso molecular. Atualmente, são considerados polímeros com as moléculas relativamente grandes, cuja em suas estruturas se encontram repetidas unidades químicas simples.

De acordo com Bernucci, et al (2010), apud Mano (1985, 1991) os polímeros são macromoléculas estruturalmente simples, constituídas de unidades estruturais repetidas em sua longa cadeia. É a junção de vários monômeros. Os polímeros podem ser classificados quanto ao seu comportamento frente às variações térmicas e nem todos podem ser adicionados ao CAP.

Podendo ser, segundo Bernucci, et al (2010) apud Mano (1985, 1991) e Leite (1999):

a) Termorrígido: não se fundem e sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Não sendo útil em misturas usinadas a quente. Exemplos: resina epóxi, poliéster, poliuretano.
b) Termoplástico: são aqueles que se fundem e se tornam maleáveis quando aquecidos, podendo ser incorporado ao asfalto em altas temperaturas. Como exemplo: PVC, polietileno, polipropileno.

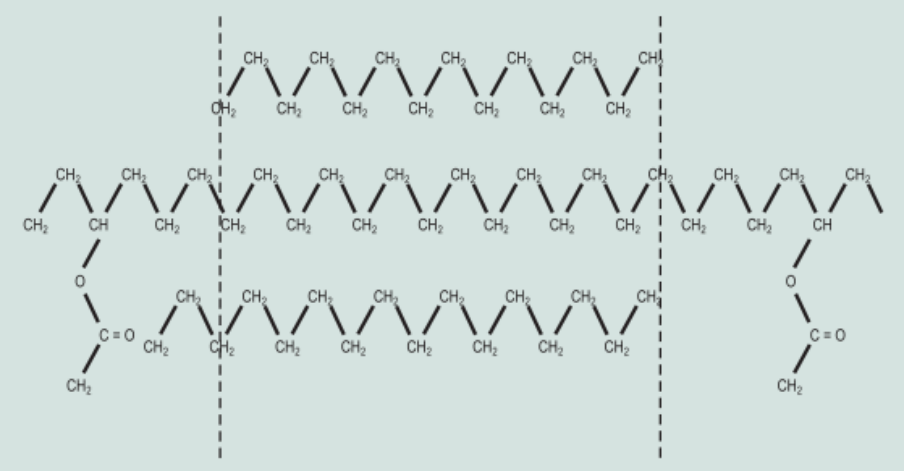
c) Elastômeros: quando aquecidos se decompõe antes de amolecer, com propriedades elásticas. Exemplo SBR.
d) Elastômeros termoplásticos: em baixa temperatura apresentam comportamento elástico, mas quando aquecidos passar a se comportar como termoplásticos. Exemplo EVA e SBS.

2.3.1 EVA – Copolímeros de etileno e acetato de vinila

Os copolímeros de etileno e acetato de vinila (EVA) são termoplásticos que apresentam segmentos de etileno, que são semicristalinos, produzidos por meio da copolimerização do monômero de acetato de vinila e etileno, pois isso é chamado de copolímero. (Braskem, 2018)

A Figura 3 mostra uma representação esquemática da conformação planar das moléculas de EVA.

Figura 3: Conformação Planar das moléculas de EVA



Fonte: Bernucci at al, 2010.

Os copolímeros EVA fornecidos pela Braskem para realização do trabalho é denominado 3019PE tendo como características, teor de acetato de vinila 19%, densidade 0,940 g/cm³, índice de fluidez 2,5 g/10 min. (Braskem, 2018).

Nesse copolímero, quanto menor o teor de acetato de vinila, maior o grau de cristalinidade e em consequência, no módulo de rigidez, nas temperaturas de amolecimento e de fusão e na diminuição da temperatura de fragilidade quando aplicado uma tensão cisalhante este escoa irreversível, pois não possui microdomínios. As maiores vantagens de seu uso são a resistência à flexão e

estabilidade térmica, aliadas a um custo razoável, pois o EVA utilizado para a modificação de asfalto vem de resíduos da indústria calçadista. (Lucena, 2005)

2.3.2 SBS - Estireno-Butadieno-Estireno

O copolímero de estireno-butadieno-estireno, SBS, é o polímero mais difundido e utilizado no mundo para a modificação do asfalto. A Figura 4 ilustra uma amostra de SBS e uma representação da sua estrutura molecular.

Figura 4: Estrutura Molecular do SBS

Fonte: http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/sbs.html, 2011.

Segundo Kraton Polymers (2011), a maior fornecedor de polímeros, o SBS consiste em blocos de unidades dos monômeros de Estireno e Butadieno. Sua estrutura mais comum é o bloco linear A-B-A (Estireno – Butadieno – Estireno), podendo apresentar tipos ramificados e blocos duplos no estilo A-B (Estireno – Butadieno). De acordo com essa disposição de suas cadeias, quando há o processamento do polímero SBS, suas rígidas ligações amolecem permitindo o fluxo.

Os polímeros SBS trazem um ganho de desempenho em relação à deformação e trincas, e uma boa variação de características independente do clima (se quente ou frio), atrelados aos dados apresentados na Tabela 1.

Entre as características únicas do SBS para modificação do asfalto estão:

- Solubilidade e alta eficiência com baixa viscosidade de processamento;
- Criação de rede polimérica no ligante asfáltico – matriz dominante;
- Resistência à trinca térmica através da tenacidade em baixa temperatura;
- Resistência à deformação permanente através da maior elasticidade;
- Resistência à fadiga devido a maior tenacidade;

São capazes de absorver os componentes oleosos do asfalto em até dez vezes o volume de polímeros. O volume da rede formada pelos domínios de estireno ligados é assim aumentado em toda a extensão do ligante asfáltico. Isso confere ao asfalto propriedades elásticas a faixas de temperatura mais elevadas, reduzindo o comportamento viscoso sob alta temperatura e o comportamento frágil sob baixa temperatura. Com isso, o asfalto retarda significativamente o desenvolvimento e a propagação de fissuras em camadas de rolamento devido ao cisalhamento. Apresenta também boa solubilidade nas frações de aromáticos do CAP pelo parâmetro de solubilidade de Hildebrand (Manoel, 2015).

Tabela 1: Características do asfalto modificado com polímero SBS – valores máximos e mínimos

CARACTERÍSTICA	EXIGÊNCIA	
	Mínima	Máxima
Penetração, 100 g, 5 s, 25 ºC, 0,1 mm	45	-
Ponto de Fulgor, ºC	235	-
Ductilidade, 25 ºC, 5 cm/min, cm	100	-
Densidade Relativa, 25 ºC/25 ºC	1,00	1,05
Ponto de Amolecimento, ºC	60	85
Ponto de Ruptura Fraass, ºC	-	-13
Recuperação Elástica, 20 cm, 25 ºC, %	85	-
Viscosidade Cinemática, 135 ºC, Cst	850	-
Viscosidade Cinemática, 155 ºC, Cst	350	-
Estabilidade ao armazenamento:		
500ml em estufa a 163 ºC, 5 dias:		
- diferença de ponto de amolecimento, ºC	-	4
- diferença de recuperação elástica, 20 cm, 25 ºC, %	-	3
Índice de Suscetibilidade Térmica (IST x 10^2)	2	5
Efeito do Calor e do Ar:		
- variação de massa, %	-	1,0
- percentagem da penetração original	50	-
- variação do ponto de amolecimento, ºC	-	4
- recuperação elástica, %	80	-

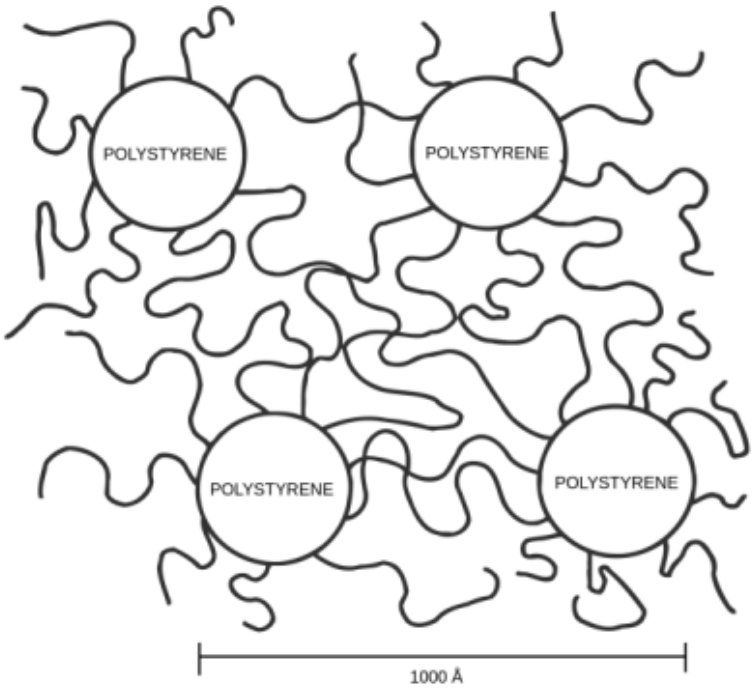
Fonte: DNER-EM 396/99, 1999.

2.3.3 Elastômero Termoplástico - TPE

Os elastômeros termoplásticos (TPEs) surgiram na década de 1970 e começaram a ser produzidos em grande escala desde então, devido as suas vantagens em relação aos elastômeros convencionais (Morin, 2011). A criação desses polímeros se deve a partir de uma busca por um material com menor densidade, menor custo de produção, maior produtividade, fácil coloração, reciclabilidade e melhor processabilidade, ou seja, a capacidade de passar por processos industriais, em termos de elastômeros (Martendal, 2016).

Neste trabalho será utilizado o terpolímero de etileno-acrilato de metila-metacrilato de glicidila (EMGMA), denominado neste trabalho como TPE, fornecido pela Prama Petroquímica com nome comercial de POLIMUL S-74. Também conhecido como borracha termoplástica, o TPE é um material semelhante à borracha e pode ser processado através de métodos como, moldação, por injeção e por extrusão. Ele é feito a partir de um termoplástico rígido com uma leve adição de borracha, incorporando aditivos. A Figura 5 apresenta uma microestrutura do TPE.

Figura 5: Microestrutura TPE-S



Fonte: RESINEX, acesso em 2018.

O TPE possui propriedades como as das borrachas, diferenciando-se pela resistência à temperatura, resistência química e melhor resposta elástica após esforço normal de compressão. Como a estrutura possui uma resposta elástica elevada e domínios rígidos e coesos a temperatura ambiente, esses domínios tem uma função semelhante à da borracha tradicional, que é impedir o deslocamento completo das cadeias moleculares quando aplicado algum esforço externo. A altas temperaturas, acima da temperatura de transição vítrea, ou de fusão, essas ligações perdem a sua coesão e permite que o material adquira certa fluidez. Quando a temperatura retorna a temperaturas mais baixas, as regiões do TPE voltam a ter ligações cruzadas. A Figura 6 mostra algumas estruturas que podem ocorrer nos polímeros. As estruturas reticulada ou com ligações cruzadas vão aparecer dependendo do enovelamento do polímero quando durante o processo de crescimento do polímero, onde as cadeias vão se dobrando uma sobre as outras.

Figura 6: Tipos de estruturas poliméricas

Fonte: Akcelrud (2007).

Com essa estrutura, é possível combinar as características mecânicas da borracha com as condições mais favoráveis de processamento dos termoplásticos (Huff e Mcalpin, 1995).

2.3.4 Pó de pneu

Segundo Morilha (2004) e Bertollo et al (2003), o asfalto modificado por borracha moída de pneus por via úmida é classificado de acordo com seu processo de

fabricação podendo ser estocável ou não estocável. O sistema não estocável é preparado com a utilização de um equipamento misturador *in loco,* devendo ser aplicado imediatamente devido à sua instabilidade e, assim, apresenta algumas características diferentes do asfalto-borracha estocável. O sistema estocável/terminal blending é produzido com borracha moída de pneus, considerada finíssima (partículas passantes na peneira #40), e devidamente misturado em um terminal especial. Esse processo produz um ligante estável, que é denominado asfalto borracha. O ligante, relativamente homogêneo, é posteriormente transportado para cada obra e pode ser utilizado em tratamentos superficiais entre camadas de CBUQ.

De acordo com ODA e JÚNIOR, 2001, muitas são as vantagens previstas em função da incorporação de borracha de pneus usados a uma Borracha de pneus em obras de pavimentação cimento asfáltico, consequentes de características citadas anteriormente e na Tabela 2. Merecem destaque:

a) Redução do envelhecimento: redução do envelhecimento por oxidação devido à presença de antioxidantes e carbono na borracha dos pneus incorporados ao cimento;
b) Aumento da flexibilidade: de acordo (Stephens, 1982; Takallou e Hicks, 1988; McQuillen et al., 1988) apud (ODA e JUNIOR, 2001) em virtude da maior concentração de elastômeros na borracha pneu, as misturas asfálticas com ligante asfalto-borracha são mais flexíveis que misturas convencionais.
c) Aumento do ponto de amolecimento: a incorporação de borracha aumenta o ponto de amolecimento do asfalto-borracha em relação ao asfalto convencional, sendo assim, aumenta a resistência ao acumulo de deformação permanente nas trilhas de rodas.
d) Redução da susceptibilidade térmica: (Heiztman, 1992, Ruth et al., 1997) apud (ODA e JUNIOR, 2001) afirmam que o uso de um ligante asfalto-borracha produz asfalto mais resistente às variações de temperatura, melhorando o desempenho tanto a baixas quanto a altas temperaturas quando comparados a pavimentos feitos com asfalto convencional.

Tabela 2: Especificações de AMB - Asfaltos Borracha

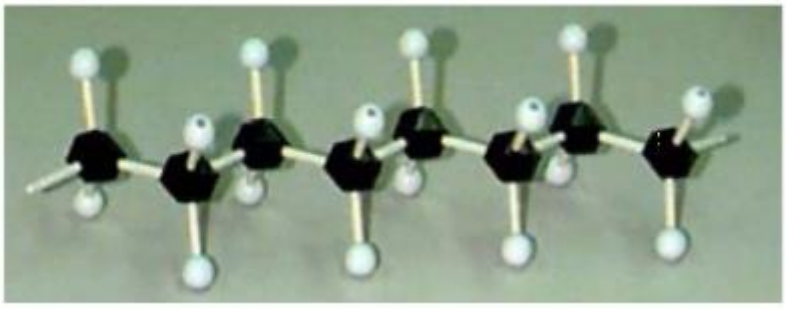
Característica	Unidade	Limite		Método	
Tipo		AB8	AB22	ABNT/NBR	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 – 70		6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	50	55	6560	D 36
Viscosidade Brookfield a 175°C, spindle 3, 20 rpm, máx.	cP	800-2000	2200-4000	15529	D 2196
Ponto de fulgor, mín.	°C	235		11341	D 92
Estabilidade à Estocagem, máx.	°C	9		15166	D 7173
Recuperação Elástica a 25° C, 10 cm, mín.	%	50	55	15086	D 6084
Variação em massa do RTFOT, máx.	% massa	1,0		15235	D 2872
Ensaios no Resíduo RTFOT					
Variação do ponto de amolecimento, máx.	°C	10		6560	D 36
Porcentagem de Penetração original, mín.	%	55		6576	D 5
Porcentagem de Recuperação Elástica Original (25°C, 10 cm) mín.	%	100		15086	D 6084

Fonte: Bernucci et al, 2010.

2.3.5 Polietileno de Baixa Densidade - PEBD

A estrutura cristalina do PEBD é a mais simples dentre os polímeros. Ela possui estrutura cristalina em zig-zag, sendo constituída pela repetição do monômero - (CH2)n - e finalizada com grupos CH3. O comprimento das ligações de carbono é cerca de 0,154 nm, e o ângulo de ligação entre os mesmos é de 109,5° (Callister, 2006). A Figura 7 mostra a estrutura da molécula de polietileno, onde as esferas escuras são átomos de carbono e as claras, de hidrogênio.

Figura 7: Representação da estrutura do PEBD

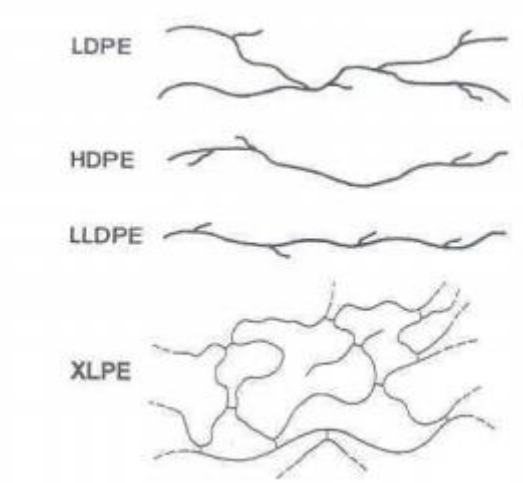


Fonte: Wasilkoski (2002).

Os polietilenos, de acordo com o processo de produção e das condições utilizadas, podem assumir várias configurações, entre elas, o PEBD ou LDPE: Polietileno de baixa densidade, PEAD ou HDPE: Polietileno de alta densidade,

LLPE: Polietileno linear de baixa densidade, XLPE: Polietileno reticulado. A Figura 8 ilustra algumas destas estruturas.

Figura 8: Número de ramificações dos polietilenos



Fonte: Wasilkoski (2002).

De acordo com Coutinho et al.2003 e Braskem, 2009, polietilenos lineares são mais rígidos que os ramificados, além de possuírem ponto de fusão mais alto, maior tensão e dureza. O PEBD, obtido através do processo de polimerização via radical livre à alta pressão e temperatura é um polímero parcialmente cristalino, sua densidade varia de 0,91 a 0,93 g/cm3, massa molar de 20.000 a 45.000 g/mol e com ponto de fusão de 100 a 120º C. A Tabela 3 mostra algumas propriedades dos polietilenos de alta densidade, polietileno de baixa densidade e polietileno linear de baixa densidade.

Tabela 3: Propriedades de alguns polietilenos

Propriedades	LLDPE	LDPE	HDPE
Densidade (g/cm^3)	0,910-0,925	0,915-0,935	0,941-0,967
Temperatura de Fusão (°C)	125	106-112	130-133
Tensão de deformação (MPa)	14-21	6,9-17,2	18-30
Elongação até a Ruptura (%)	200-1200	100-700	100-1000
Módulo de Flexão (MPa)	248-365	415-795	689-1654
Resist. ao Impacto Izod (J/m)	–	0,67-21	27-160
Dureza (Shore D)	41-53	45-60	60-70

Fonte: Feldman e Barbalata (1996).

O PEBD possui características ou propriedades que são controladas durante sua fabricação, para garantir um bom desempenho do produto final. As análises de controle de qualidade mais frequentes no processo de fabricação são o índice de fluidez, densidade e aparência do filme tubular.

2.4 Definição do CAF

Atualmente uma novidade surge no âmbito de pavimentação asfáltica, o que pesquisadores denominam como CBUQ estocável, CAE, CAF ou popularmente asfalto pronto ou asfalto frio. De acordo com Oliveira (2017) apud Santana (2016), trata-se de uma mistura usinada a quente acrescido de um aditivo retardador de pega, desta maneira pode ser estocável entre 12 a 24 meses variando de acordo com o fabricante e a qualidade do aditivo. Essa novidade já se encontra comercializada no país.

2.5 Asfalto modificado por polímero

Asfaltos modificados por polímeros – AMP representam um avanço tecnológico de construção de pavimentos. Várias características podem ser atribuídas aos novos AMP em forma de melhorias no trabalho do ligante em serviço no pavimento. A Tabela 4 mostra os tipos de polímeros mais utilizados e as principais características destes polímeros nas misturas asfálticas.

Tabela 4: Benefícios de modificadores de asfalto (Shell, 2003)

Modificador	Deformação Permanente	Trincas Térmicas	Trincas de Fadiga	Dano por Umidade	Envelhecimento
Elastômeros	*	*	*		*
Plastômeros	*				
Borracha de pneu	*	*	*		*
Negro-de-fumo	*				*
Cal				*	*
Enxofre	*				
Modificadores químicos	*				
Antioxidante					*
Melhorador de adesividade				*	*
Cal hidratada				*	*

(*) Símbolo significa que há benefício.

Fonte: Bernucci, et al, 2010.

A razão para combinar o asfalto com determinados polímeros é prevenir avarias prematuras no pavimento e desse modo aumentar a vida em serviço do pavimento. A função básica dos polímeros é reduzir a consistência e a susceptibilidade térmica do asfalto e por esse motivo aumentar sua resistência à deformação permanente em temperaturas altas de serviço enquanto impede fissuras em baixas temperaturas de serviço. O polímero também melhora o comportamento elástico do asfalto e assim ainda contribui para a sua resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga. “O polímero pode contribuir também para uma melhor adesão entre agregados e asfalto, diminui a abrasão e melhora a resistência à oxidação” (ZANZOTTO & KENNEPOHL, 1996).

A despeito do grande número de produtos modificadores, existem apenas alguns tipos que são adequados como modificadores de asfalto. Os polímeros, quando usados como modificadores, são compatíveis com o asfalto, resistem à degradação em temperaturas comumente usadas nas misturas asfálticas e possuem preços acessíveis. “O sucesso da modificação depende das características do asfalto usado, do tipo e quantidade de polímero, bem como do processo usado na preparação desses asfaltos modificados” (ISACSSON & LU, 1999).

A função básica dos polímeros é reduzir a consistência e a susceptibilidade térmica do asfalto e por esse motivo aumentar sua resistência à deformação permanente em temperaturas altas de serviço enquanto impede fissuras em baixas temperaturas de serviço. O polímero também melhora o comportamento elástico do asfalto e assim ainda contribui para a sua resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga. “O polímero pode contribuir também para uma melhor adesão entre agregados e asfalto, diminui a abrasão e melhora a resistência à oxidação” (ZANZOTTO & KENNEPOHL, 1996).

Segundo FREITAS (1996), os polímeros modificam uma ou mais das seguintes propriedades:

a) Susceptibilidade térmica, que caracteriza a variação da consistência, em função da temperatura. A incorporação de polímero tem geralmente por finalidade a redução dessa susceptibilidade, ampliando a faixa que separa a fragilidade a frio do amolecimento a quente.

b) Coesão, que é definida como a energia necessária para romper uma película de ligante. Varia em função da temperatura, passando por um máximo. A finalidade da modificação com polímero é o aumento da coesão e/ou “faixa de coesão” conseguindo assim, uma consistência satisfatória em toda a faixa de temperatura de serviços.
c) Elasticidade, que é caracterizada como a deformação causada sob efeito do tráfego e das variações de temperatura. A elasticidade é a aptidão para suportar essa deformação de modo reversível sem rompimento. A finalidade da incorporação de polímero é de acentuar a elasticidade e mantê-la na faixa mais ampla das temperaturas de utilização.
d) Resistência à fadiga, que é a propriedade que os materiais têm de resistir quando solicitados de forma repetida, entretanto, tendem a consumir progressivamente seu “capital” de resistência. A incorporação de polímero visa aumentar esse “capital”, sobretudo às baixas temperaturas.

Segundo MARTINHO (1994), os asfaltos modificados, em especial com o polímero SBS, quando em temperaturas altas, superiores ao seu ponto de fusão, comportam-se como plásticos podendo ser moldados e após sua fusão, quando de seu resfriamento são devolvidas suas propriedades elásticas. LU & ISACSSON (1997), em estudos com asfaltos modificados por polímero SBS, observaram que o polímero SBS fez aumentar a elasticidade dos asfaltos em altas temperaturas e aprimorou a flexibilidade dos mesmos a baixas temperaturas. Concluíram deste modo, que essas melhorias nas propriedades do asfalto alertam para um aumento na resistência às deformações permanentes nas trilhas de roda e às trincas, nas altas e baixas temperaturas, respectivamente.

2.5.1 Compatibilidade CAP – polímero

A compatibilidade entre o asfalto e o polímero está relacionada a dois parâmetros: o primeiro, com relação à solubilidade pelo parâmetro de Hidelbrand e o segundo, pelo parâmetro da cristalinidade dos polímeros (Manoel, 2014).

De acordo com Hildebrand, pode se determinar um parâmetro para avaliação da solubilidade de um determinado solvente efetuando-se a raiz quadrada da sua densidade de energia de coesão, encontrando-se um valor numérico que indica a sua capacidade de solvência. Este valor foi denominado como parâmetro de

solubilidade de Hildebrand (δt) (VILLA et al 2011). A densidade da energia de coesão encontra-se em função da entalpia de vaporização de um líquido, o valor total da energia fornecida para que este seja totalmente convertido em gás. Deste modo, a miscibilidade entre duas substâncias será possível quando apresentarem *densidades de energia coesiva* próximas (CAETANO 2010-2014).

A densidade de energia coesiva tem a seguinte expressão conforme equação 1 (CAETANO 2010-2014)

$$c = \frac{\Delta H - RT}{V_m} \quad ; \quad \text{onde} \quad \partial = (c)^{1/2} = \left(\frac{\Delta H - RT}{V_m}\right)^{1/2} \tag{1}$$

Sendo:

ΔH – O calor de vaporização;

R – Constante dos gases perfeitos;

T – Temperatura absoluta, Kelvin;

Vm – Volume de uma mole de substância. (Parâmetro de Solubilidade de Hildebrand)

δ = densidade de energia coesiva.

Buscando aperfeiçoar o parâmetro, Charles M. Hansen, em 1966, dividiu o δt em três componentes: coeficiente de dispersão (δd), polaridade (δp) e pontes de hidrogênio (δh) que estão relacionados de acordo com a equação 2 abaixo (VILLA et al 2011):

$$\delta_t^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \tag{2}$$

Tal divisão auxiliou na descrição e a previsão das interações entre moléculas do solvente e do soluto. Para a determinação da contribuição percentual de cada um destes parâmetros para o valor de δt pode ser feita pelo dos parâmetros fracionários (f). Estes foram originados matematicamente dos parâmetros de Hansen (VILLA et al 2011), através das equações 3, 4 e 5:

$$f_d = \delta_d^2 * 100/(\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2) \tag{3}$$

$$f_p = \delta_p^2 * 100/(\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2) \tag{4}$$

$$f_h = \delta_h^2 * 100/(\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2) \tag{5}$$

Têm-se como uma das principais vantagens dos parâmetros de Hildebrand/Hansen a sua capacidade de avaliar a solvência de uma determinada mistura de solventes. Para tal, considera-se a fração em volume e o δt de cada solvente na mistura, fazendo uma ponderação das massas em função da fração molar de cada componente. conforme a equação 6 (VILLA et al 2011). A tabela 5 mostra os parâmetros de solubilidade de Hildebrand.

$$\delta_{t(mistura)} = (\delta_{iA} X_A + \delta_{iB} X_B) \quad (6)$$

Onde:

- δta e δtb são os parâmetros de Hildebrand para os solventes A e B, respectivamente;

- Xa e Xb são as frações em volume de cada componente na mistura.

Tabela 5: Parâmetros de solubilidade de Hildebrand

Tipo de Borracha	∂ (MPa)$^{1/2}$
Acetato de vinilo e etileno (EVA) c/ 30% vinilo	21,1
Acetato de vinilo e etileno (EVA) c/ 40% vinilo	19,2
Acetato de vinilo e etileno (EVA) c/ 67% vinilo	19,0
Acrilonitrilo butadieno (NBR) c/ 18% AcN	17,8
Acrilonitrilo butadieno (NBR) c/ 18–30% AcN	17,8–19,0
Acrilonitrilo butadieno (NBR) c/ 25% AcN	19,0
Acrilonitrilo butadieno (NBR) c/ 39% AcN	21,1
Acrilonitrilo butadieno (NBR) c/ 40% AcN	21,3–21,5
Estireno butadieno (SBR)	16,6–18,2
Estireno butadieno (SBR) c/ 15% estireno	17,1
Estireno butadieno (SBR) c/ 23% estireno	17,2–17,4
Estireno butadieno (SBR) c/ 40% estireno	17,6
Etileno Propileno (EPM)	16,2
Etileno propileno dieno (EPDM)	15,3–17,6
Fluorada (FPM)	16,7
Fluorosilicone (FVMQ)	18,0
Iso butileno isopreno (IIR)	15,3–16,6
Natural (NR)	16,2–17,4
Polibutadieno (BR)	16,2–17,6
Policloropreno (CR)	16,6–19,2
Policloropreno GN (CR)	19,2
Polietileno cloro sulfonado (CSM)	19,4
Poliisopreno (IR)	16,2–17,4
Polissulfureto (T)	18,4–20,5
Politetrafluoroetileno (PTFE)	12,7
Poliuretano (AU/EU)	20,0–21,1
Silicone (Q)	14,3–22,5

Fonte: Caetano (2010-2014).

O grau de cristalinidade dos polímeros pode ter influência significativa sobre as propriedades mecânicas, pois o mesmo afeta a extensão das ligações secundárias intermoleculares, existentes em grande quantidade, nas regiões cristalinas, entre os segmentos de cadeias adjacentes (Machado, 2008).

De acordo com Callister (2002), a cristalinidade dos polímeros é determinada pela forma e simetria de suas moléculas, pela ramificação, rigidez, regularidade e também, pelos parâmetros de processamento. Dificilmente o grau de cristalinidade de um polímero fica acima de 90%, pois ele é formado por longas cadeias, atraídas por fracas forças de van der Waals. O grau de cristalinidade tem bastante influência nas propriedades mecânicas e viscoelásticas destes materiais.

Um liquido viscoso (CAP) pode assumir diferentes conformações, mas há (tendência de assumir conformação ordenada (cadeias em estado de menor energia). Sabe-se que os polímeros cristalinos e semicristalinos são formados por duas fases distintas. A fase na qual as cadeias poliméricas estão organizadas é a região cristalina, enquanto a fase onde as cadeias não estão organizadas e não possuem alinhamento paralelo, é a região amorfa.

Os polímeros quando aquecidos perdem a sua cristalinidade por conta do desarranjo de suas estruturas organizacionais. Porém, quando resfriados lentamente retorna a estrutura cristalina. Na interação dos polímeros com os asfaltos, tem-se que polímeros amorfos são mais interativos que polímeros cristalinos. Quanto menor o grau de cristalinidade, maior a facilidade de solubilidade nas frações do asfalto (Manoel, 2015). A associação do grau de cristalinidade e dos parâmetros de Hildebrand formam os parâmetros necessários para que um polímero possa interagir com o CAP. Isto explica, por exemplo, porque o polietileno de alta densidade – PEAD (90% de cristalinidade) é mais difícil de solubilizar no CAP que polietileno de baixa densidade (40% de cristalinidade), embora ambos possuem a densidade de energia coesiva com valores próximos. Assim, os parâmetros grau de cristalinidade e solubilidade de Hildebrand devem ser vistos com uma única variável visando a interação com os asfaltos (Manoel, 2015).

3 Metodologia de pesquisa

3.1 Preparação do corpo de prova – AMP

As amostras de AMP foram produzidas a partir do processo de aquecimento do CAP 50/70 entre, aproximadamente, 140°C a 150°C, atingindo um ponto de viscosidade ideal para que a incorporação do polímero fosse realizada. Foram confeccionadas seis amostras de aproximadamente 500g de CAP e, a partir dessa quantidade de massa, determinada a quantidade dos polímeros adicionada aos mesmos. Através da equação 7, de acordo com as porcentagens em titulo em massa pré-definidas com teores utilizados comumente pelos fabricantes.

$$t = \frac{mp}{mp+mc}\text{; desenvolvendo: } mp = \frac{-t.mc}{t-1} \quad (7)$$

sendo,
t = teor de polímero ou aditivo utilizado; mp = massa do polímero ou aditivo utilizado (gramas) e mc = massa do CAP (g);

Nos AMPs compostos por polímeros contendo estireno, como o pó de pneu, e o SBS, foram adicionados 2% de compatibilizante neutro aromático pesado – NPA, conforme a prática industrial visando aplicar a compatibilidade entre as frações do CAP e do polímero.

No AMP composto com TPE, foi adicionado um percentual de 0,15% de ácido polifosfórico – PPA, conforme recomendação do fabricante do TPE – Polimul S-74.

3.2 Modo de incorporação

- Agitador mecânico de alto cisalhamento

Consiste em manter a máquina de mistura entre uma temperatura pré-definida por meios práticos, de 160°C a 170°C sob agitação circular em alto cisalhamento, por 90 min. A Figura 9 mostra o misturador utilizado no processo de incorporação do polímero ao CAP.

Figura 9: Misturador utilizado no processo de produção do AMP

Fonte: Próprios Autores, 2018.

A composição do CAP com o polímero será dada em teores utilizados na prática industrial, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6: Composição das misturas de CAP com polímeros

Polímero	Teor de polímero (%)	Temperatura	Tempo de incorporação	Aditivo	Obs:
Pó de pneu	16,0	175°C	90 min.	2% NPA	Granulometria – entre peneiras 0,59 e 0,149 mm.
EVA	4,0	165°C	90 min.	Sem aditivo	
TPE	1,8	165°C	90 min.	0,15% PPA	
SBS	4,0	175°C	90 min.	2% NPA	
PEBD	3,5	170°C	90 min.		

Fonte: Autores, 2018.

- Processo de incorporação:

Segundo Shinohara et al (2015), o procedimento para a realização da mistura do CAP modificado com o polímero provém das seguintes etapas:

a. Aquecer o ligante 50/70, previamente aquecidos a 150°C por aproximadamente 20 min. (tempo que o ligante ficasse fluido);
b. Adicionar aproximadamente n% em peso de polímero X – vide Tabela 6;
c. Manter o agitador tipo hélice com pás de ~2 cm de diâmetro em alta rotação de cisalhamento (> 1000rpm) mantendo mistura em uma temperatura pré-definida na Tabela 6 sob agitação circular, por 90 min.
d. Após 60 min. do início da incorporação do polímero, fazer a adição do aditivo Aminocap para CAF, na concentração e 20% p/p conforme equação 7 para todas as amostras,

3.3 Ensaios de referência:

Para controle dos corpos de prova e dos materiais, seguem resumidamente os ensaios a serem realizados.

3.3.1 Viscosidade Brookfield

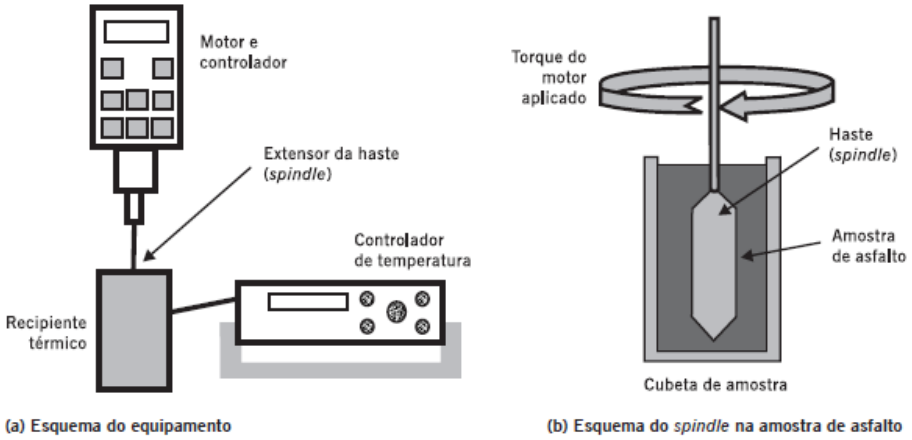
Descrição do ensaio:

O ensaio visa determinar a viscosidade dinâmica – força necessária para vencer a resistência que o fluido oferece ao movimento de rotação com velocidade constante e uniforme, através do movimento de uma haste, como ilustrado na Figura 10.

No ensaio de viscosidade Brookfield (NBR 15184, 2004) são seguidas as etapas a seguir.

a) Colocar 8g da amostra, previamente aquecido entre 140 e 150°C, no molde do ensaio;
b) Escolher a geometria indicada na especificação ANP - spindle correspondente ao ensaio (SC4-21) e ajustá-lo à máquina;
c) Ajustar a rotação correspondente para cada temperatura:
d) Realizar o ensaio nas temperaturas de 135°C, 150°C ou 177°C, aguardando no mínimo 30 minutos em cada temperatura para estabilização. Proceder as leituras em centipoise - cP.

Figura 10: Esquema dos equipamentos no ensaio de Viscosidade Brookfield



Fonte: Bernucci et al (2010).

3.3.2 Ensaio do Equivalente de Areia

O ensaio:

O ensaio será aplicado com o objetivo de determinar o comportamento do solo em relação a sua expansibilidade e sua capacidade de suporte pelo índice CBR. Para tal, determina-se a quantidade de materiais finos plásticos (argila e silte) na fração de areia do solo, o que implica na quantidade de impurezas contidas neste seguindo a norma DNER-ME 054/97 (OLIVEIRA et al, 2018) O procedimento do ensaio segue as seguintes etapas:

A amostra é obtida com o material que passa na peneira de 4,8 mm. Se a amostra inicial não estiver úmida, deverá ser umedecida antes do peneiramento. Se o agregado graúdo apresentar finos aderentes que não se desprendam durante o peneiramento, deve-se secá-lo e esfregá-lo com as mãos, juntando-se os finos resultantes ao material que passou na peneira.

Procedimento do ensaio:

a) Abertura da pinça do tubo de ligação. Acionamento do sifão, soprando-se no topo do garrafão que contém a solução, através de um pequeno tubo. Verificando o escoamento da solução fechar a pinça;

b) Sifona-se a solução de trabalho para a proveta, até atingir o traço de referência a 10 cm da base;

c) Transfere-se para a proveta, com auxílio do funil, o conteúdo de um recipiente de medida cheio de amostra preparada e rasada na superfície. O conteúdo do recipiente corresponde a cerca de 110 g de material solto. Bate-se o fundo da proveta firmemente com a palma da mão várias vezes, a fim de deslocar as bolhas de ar e ajudar a molhar a amostra. Deixar a seguir, a proveta em repouso durante 10 min.;

d) Após o período de 10 min., tapa-se a proveta com a rolha de borracha e agitá-la vigorosamente, num movimento alternado, horizontalmente. Executam-se 90 ciclos em aproximadamente 30s, com um deslocamento de cerca de 20 cm. Cada ciclo compreende um movimento completo de vaivém. A fim de agitar satisfatoriamente a amostra como antes foi especificado é necessário que o operador agite apenas com os antebraços;

e) Retira-se a rolha e introduzir o tubo lavador, após limpeza das paredes rapidamente e imediatamente inserção do tubo até o fundo da proveta. Agita-se levemente com o tubo lavador a camada de areia para levantar o material argiloso eventualmente existente. Esta operação deve ser acompanhada de leve giro da proveta. Quando o líquido atingir o círculo de referência superior da proveta (a 38 cm da base), suspende-se o tubo lavador lentamente sem parar o escoamento e de tal modo que aquele nível se mantenha aproximadamente constante. Regular o escoamento pouco antes de se retirar completamente o tubo e ajustar o nível naquele traço de referência. Deixar-se repousar 20 minutos sem perturbação. Qualquer vibração ou movimento da proveta durante esse período interferirá com a velocidade normal de sedimentação da argila em suspensão e será causa de erro no resultado;

f) Após o período de 20 min., determina-se o nível superior da suspensão argilosa, efetuando a leitura com precisão de 2 mm;

g) Introduza-se o pistão cuidadosamente na proveta até assentar completamente na areia. Girar a haste ligeiramente, sem empurrá-la para baixo, até que um dos parafusos de ajustagem se torne visível. Nesta posição, desloca-se o disco que corre na haste até que ele assente na boca da proveta, fixando-o à haste, por meio de um parafuso nele existente. Determina-se o nível do centro de um dos parafusos de ajustagem e adotá-lo como leitura correspondente ao nível superior

da areia. Este pode ser também determinado medindo-se a distância entre o topo do disco que se apoia na boca da proveta e a base inferior do peso cilíndrico, e subtraindo-se desta, a mesma distância, medida quando a sapata está assente no fundo da proveta (constante do aparelho).

3.3.3 Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”

De acordo com a DNER - ME035/98, o ensaio tem como objetivo definir o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 a 33 rpm (rotações por minuto). O procedimento segue as seguintes etapas:

a) Fixação da graduação a ser adotada para as amostras
b) O material recebido é lavado e seco em estufa, à temperatura entre 105ºC e 110ºC, até se verificar constância de peso; depois de seco, peneira-se o agregado e quarteiam-se as diferentes porções retiradas nas diferentes peneiras, para fornecer a amostra da graduação escolhida;
c) Determinam-se as massas das porções escolhidas, com aproximação de 1 g, e tendo em vista a obtenção das massas especificadas na Tabela 7, obedecendo-se às respectivas tolerâncias. Reúnem-se, a seguir, as diversas porções da mesma graduação, misturam-se bem e somam-se as massas parciais correspondentes, obtendo-se, assim, a massa da amostra seca, antes do ensaio (mn).
d) Verificada a limpeza interna do tambor, colocam-se no mesmo a amostra e a respectiva carga abrasiva, a seguir é cuidadosamente fechado para evitar perda de material;
e) Faz-se girar o tambor com velocidade de 30 a 33 rpm até completar 500 rotações, para as graduações A, B, C e D e 1000 rotações para as graduações E, F, e G, conforme Tabela 7.
f) Retira-se todo o material do tambor, separam-se as esferas, limpam-se as mesmas com a escova, e faz-se passar a amostra na peneira 1,7 mm, rejeitando-se o material passante,
g) Lava-se o material retido na própria peneira (1,7 mm); reúne-se o mesmo, e em seguida é seco em estufa à temperatura entre 105ºC e 110ºC, durante, no mínimo, 3 horas;

h) Retira-se o material da estufa, deixa-se esfriar, e determina-se sua massa com aproximação de 1 g, obtendo-se a massa da amostra lavada e seca (mn').

A Tabela 7 apresenta as massas a serem utilizadas de acordo com a faixa granulométrica. A Tabela 8 mostra a quantidade de esferas correspondentes a determinada faixa granulométrica.

Tabela 7: Graduação para ensaio

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
63	50	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
50	38	—	—	—	—	5000 ± 50	5000 ± 50	—
38	25	1250 ± 25	—	—	—	—	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	—	—	—	—	—	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
9,5	6,3	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
6,3	4,8	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
4,8	2,4	—	—	—	5000 ± 10	—	—	—
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: DNER-ME 035/98, 1998.

Tabela 8: Carga Abrasiva

Graduação	Número de Esferas	Massa de Carga (G)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.300 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Fonte: DNER-ME 035/98, 1998.

3.3.4 Ensaio de Adesividade

De acordo com a norma DNER-ME 078/94, a adesividade é a propriedade que tem o agregado a ser aderido por material betuminoso. É verificada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida, a 40 °C, à ação de água destilada, durante 72 horas.

Descrição do ensaio:

A amostra de agregado a ser utilizada no ensaio corresponde a 500g de material passando na peneira 19 mm e retido na 12,7 mm. Deve ser lavada e colocada dentro d'água destilada durante 1 min. Em seguida deve ser levada para estufa, a 120° C, e nela permanecer durante 2 horas. A amostra de agregado preparada e o ligante betuminoso são aquecidos, se necessário, à temperatura especificada. Sobre o agregado é colocado uma quantidade de ligante e com espátula procede-se ao completo envolvimento do agregado com o ligante.

3.3.5 Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall a frio

Este método tem por objetivo determinar a estabilidade e a fluência Marshall em misturas betuminosas. Para misturas usinadas a quente, segue a metodologia DNER – ME 043/95. Para as misturas processadas a frio, a estabilidade e fluência Marshall seguem a norma DNER ME- 107/94.

Inicialmente, foram preparados 3 (três) corpos de prova (CPs) a fim de serem utilizados no ensaio de resistência Marshall, seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma DNER ME- 043/95, para determinar o teor ótimo de ligante da mistura asfáltica. Foram utilizados 1250g de agregados resultantes de processo de aciaria para cada CP, utilizando a granulometria inicial dos agregados. O CAP utilizado nestes 3 CP's não foi modificado por polímero e não continha o aditivo. Esse ensaio foi referente a produção do CBUQ como balizados do teor de ligante. Os CPs Marshall foram compactados à quente, utilizando 75 golpes de cada lado, resfriados em temperatura ambiente, e desformados com auxílio de um macaco hidráulico, colocados em banho-maria à 60ºC durante 40 min e rompidos à quente. Utilizou-se o teor de 6,03%, 7% e 8,09% de ligante em título de massa (percentuais recalculados).

Na sequência, foram preparados corpos de prova com CAP modificado por polímero e com adição de 20% de aditivo para CAF, seguindo a norma DNER – ME 043/95, para a usinagem, mas o rompimento dos CP's seguiu a norma DNER - ME 107/94 a frio. Os teores dos polímeros e a formulação seguem conforme Tabela 6. Nesta fase, a granulometria das amostras foi enquadrada na faixa D do DNIT conforme Tabela 9. A recomendação de utilização da faixa D se dá pelo fato de corresponder a uma quantidade maior de materiais finos em sua condição, que ficarão melhor confinados na utilização em operações tapa buracos.

Tabela 9 – Faixa Granulométrica de Ensaio Marshall

Faixa D (DNIT)		
Abertura em polegadas	abertura em mm	massa de amostra (g)
2		0
1	25,40	0,0
3,8	9,52	250,0
4	4,76	150,0
10	2,00	162,5
40	0,42	250,0
200	0,075	218,8
fundo		218,8
	Total:	**1250**

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Os corpos de prova Marshall foram usinados à quente e moldados a frio com 75 golpes de cada lado, visando o mesmo processo de aplicação do CAF. O rompimento utilizado foi semelhante ao PMF, uma vez que a proposição de aplicação da massa será a frio, e os valores comparativos seguem a norma de especificação de serviço DNER ES317-97. Os CP's ficaram em banho-maria 40º C por 1 hora, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela DNER-ME 107/94. A indicação de utilização de 75 golpes foi em função da recomendação do fabricante do aditivo, visando a cura após compactação pelo próprio tráfego.

O teor de CAP na composição é feito com base no ensaio Marshall, utilizando os valores do teor de vazios totais da mistura, ou simplesmente Volume de Vazios (VV) e a relação Betume Vazios (RBV). Estes valores são obtidos pelas equações de 8 a 12. Outros dados calculados são o volume de Vazios nos Agregados Minerais (VAM), que representa o que não é agregado numa mistura, ou seja, vazios com ar e asfalto e ainda os Vazios Cheios com Betume (VCB), que diz respeito tanto ao asfalto disponível para a mistura como aquele absorvido.

$$Vv = \frac{DMT \ - \ Gmb}{DMT} \tag{8}$$

$$VCB = \frac{Gmb \times \%_a}{G_a} \tag{9}$$

$$VAM = Vv + VCB \tag{10}$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \tag{11}$$

Onde:

DMT = densidade máxima teórica da mistura (g/cm^3); Gmb = densidade aparente do CP (g/cm^3); %a = percentual de asfalto na mistura; Ga = densidade do asfalto g/cm^3;

O teor de CAP tem como referência a faixa granulométrica da mistura prevista conforme a Tabela 10, praticada no Brasil.

Tabela 10: Referência Marshall para dosagem do teor de ligante

Faixas	Vv (%)		RBV (%)	
	mín.	máx.	mín.	máx.
A (DNER)	4	6	65	72
B e C (DNER)	3	5	75	82
3 (Aeronáutica)	3	5	70	80
7 (Aeronáutica)	5	7	50	70

Fonte: DERSP-ET-DE-P00/027, 2005.

A estabilidade Marshall é calculada multiplicando o valor da leitura da prensa pelo fator de correção da altura dos corpos de prova, conforme a equação 12.

$$f = 927{,}23\ h^{-1{,}64} \quad (12)$$

Sendo,

h = altura do corpo de prova;

4 Resultados e discussões

Seguem as discussões dos ensaios realizados.

4.1 Resultado da Viscosidade Brookfield

O ensaio de Viscosidade Brookfield foi realizado com a amostra de CAP puro, obtendo-se os seguintes resultados na Tabela 11:

Tabela 11: Resultado Ensaio Viscosidade Brookfield – CAP puro

TEMPERATURA DO CAP	Viscosidade - CENTIPOISE (cP)
135°C	342,5
150°C	172,3
177°C	64,9

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Tendo como referência os valores especificados por Bernucci et al (2010), em que a viscosidade mínima do CAP 50/70 é de: 274 cP a 135°C, 112 cP a 150°C e entre 57 e 285 cP a 177°C, foram obtidos valores significativos ao CAP utilizado nesse trabalho, significando uma boa consistência ao ser colocado em contato com os agregados, tanto em processo de bombeamento, quanto em estocagem. Pela viscosidade este CAP se enquadra como CAP 50/70.

4.2 Resultado da destilação do aditivo para aplicação do CAF

Inicialmente foi proposto fazer um ensaio de destilação do aditivo, visando encontrar a temperatura inicial de volatilização do mesmo, face ao processamento a quente. Para tal, utiliza-se o método de destilação de asfalto diluído de petróleo ASTM D402. Neste ensaio, contatou-se que não houve nenhuma projeção de gota destilada com valores inferiores a 230º C, corrigido a pressão atmosférica, isto é, não houve volatilização do aditivo abaixo desta temperatura.

Visto que o objetivo do trabalho é que haja a usinagem do asfalto modificado em uma temperatura de no máximo 180°C, o ensaio foi interrompido e os resultados obtidos na destilação do aditivo foram satisfatórios. Com o início da sua ebulição dado a partir de uma temperatura de 248°C (sem correção da pressão atmosférica) é inferido que o aditivo não perdeu nenhum composto volátil durante sua usinagem e consequente incorporação ao CAP.

4.3 Resultado da Granulometria

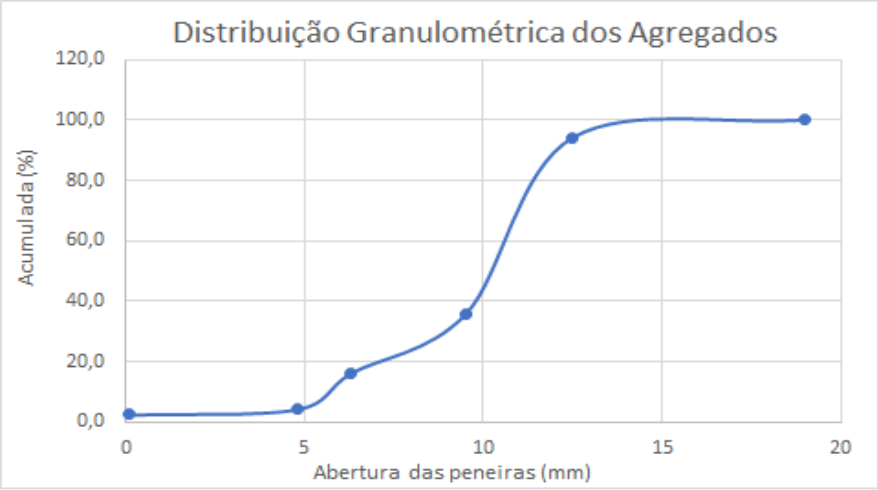
A análise do rejeito de mineração obteve os resultados perante característica granulométrica dos agregados, descritos na Tabela 12. O gráfico da Figura 11 representa a distribuição granulométrica destes agregados, indicando uma descontinuidade na granulometria, que é uma característica da amostragem utilizada.

Tabela 12: Dados do ensaio de granulometria

Peneira:	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)
19 mm	402,98	5,76
12,5 mm	4082,81	58,32
9,5 mm	1369,74	19,57
6,3 mm	835,34	11,93
4,8 mm	129,63	1,85
Fundo	179,63	2,57

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Figura 11: Granulometria da fração de agregados



Fonte: Próprios Autores, 2018.

Discussões:

Tendo em vista os resultados obtidos na tabela e o gráfico acima, pode-se inferir que os agregados utilizados no modo em que se apresentam, possuem

granulometria considerada aberta, onde nas faixas intermediárias, caracterizadas pela peneira de 12,5 mm, se passa uma quantidade significativa de agregado. A pequena quantidade de material fino se dá devido a separação do rejeito, de acordo com a quantidade de agregados utilizados e verificação do mesmo a partir do ensaio de Equivalente de Areia.

A variação da granulometria para adequação do pavimento asfáltico em relação a faixa granulométrica é determinada pela quantidade de agregado retida e passada em cada abertura de peneira, variando de sua forma de obtenção e destino (uso). A Tabela 13 mostra a classificação do DNIT dos agregados em relação a granulometria.

Tabela 13: Referência de resultados do ensaio de granulometria

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: NORMA DNIT 031/2006, 2006.

A amostra de agregado no modo em se apresenta, se enquadra na faixa “B” devido ao fato que a quantidade comparada entre a tabela de especificação 13 tem-se:

- 94,25% de agregados passantes na peneira 19 mm;
- 16,47% de agregados passantes na peneira 9,5 mm;
- 4,54% de agregados passantes na peneira 4,8 mm;

Por conta da maioria da quantidade de agregados passantes estarem de acordo com o intervalo entre 80-100%, na faixa B, fora arbitrado tal classificação tanto para este ensaio, quanto para o de Abrasão Los Angeles.

A densidade máxima teórica DMT, pode ser calculada como na equação 13.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%_{CAP}}{G_{CAP}} + \frac{\%_1}{G_1} + \frac{\%_2}{G_2} + ... + \frac{\%_n}{G_n}} \quad (13)$$

Onde, G é a massa do elemento analisado;

4.4 Resultado do Ensaio Equivalente de Areia

O ensaio de equivalente de areia tem um propósito norteador no sentido da utilização da fração fina na granulometria dos agregados nos ensaios de estabilidade e fluência Marshall. O ensaio de equivalente de areia, segue a norma DNIT ME 064, foi conduzido em duas amostras distintas. Uma amostra contendo somente lama de mineração, enquanto a outra amostra composta de uma mistura de 50% de lama e 50% de rejeito ou agregado de mineração, com o intuito de determinar se a fração de lama poderia alcançar parâmetros que permitam sua utilização na composição do CBUQ. O conjunto lama e rejeito tem o objetivo de verificar a influência do rejeito no ensaio de Equivalente de Areia sobre a fração de lama (Oliveira et al, 2018). A Tabela 14 mostra os resultados obtidos.

Tabela 14: Resulado do ensaio de equivalente de areia

		Amostra de Lama		Amostra Rejeito + LAMA	
	Equivalente de areia	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
processo 1	Areia do floculado + areia (H1 cm)	30,5	31,5	8,5	9,7
	Altura da areia (H2 cm)	3,0	2,8	3,5	3,8
	Equivalente de areia (EA=H2/H1)*100)	9,8	8,9	41,2	39,2
	média %	9,4		40,2	
processo 2	Distância entre a referência superior e o topo da suspensão argilosa (d1 mm)	75,0	65,0	283,0	282,0
	Distância entre a base do cilindro e o topo do disco (d2 mm)	48,0	48,0	53,0	54,0
	Altura de k (constante do aparelho - mm)	23,0	23,0	23,0	23,0
	Equivalente de areia (EA=(D2-K) / (380-D1) * 100	8,2	7,9	30,9	31,6
	média %	8,1		31,3	
	Resultado final %	8,70		35,73	

Fonte: Oliveira et al, 2018.

Os valores de referência para o ensaio de equivalente de areia em solo para utilização nas camadas dos pavimentos são descritos na tabela 15.

Tabela 15: Valores de referência do equivalente de areia

Equivalente de Areia	Classificação
E.A. > 30	Solo satisfatório
E.A. < 20	Solo ruim
20 < E.A. < 30	Recorrer aos ensaios clássicos de caracterização

Fonte: DNIT ME 064, 2004.

Os resultados indicam que a lama não atende os parâmetros para sua utilização em camadas de solo para pavimentação. Entretanto, o rejeito mostra-se como material viável na utilização para pavimentação, sendo que 50% deste foi capaz de proporcionar melhora significativa nos resultados, em conjunto com a lama. Infere-se que a utilização somente da camada de rejeito atenderia a um percentual relativo em torno de 63% de Equivalente de Areia, indicando que sua utilização na pavimentação é viável (Oliveira et al, 2018). Com estes resultados, a fração de lama não será utilizada nos testes de CBUQ e CAF como fração fina

neste trabalho. Trabalhos futuros poderão ser realizados visando a inclusão da lama nas misturas betuminosas. Assim, foi utilizada apenas a fração rejeito ou agregado de mineração nos CPs.

4.5 Resultado do ensaio de abrasão “Los Angeles”

O ensaio de Abrasão Los Angeles mede o desgaste sofrido pelo agregado em um tambor rotativo junto com uma quantidade de esferas metálicas similar a um moinho de bolas. Tendo como referência as tabelas 8 e 9, determinou-se que a massa de amostra será de 5000 g, composta por 2500 g retidos nas peneiras 12,5 e 9,5 mm, que será submetida a 500 rotações na máquina “Los Angeles”, por 11 esferas de massa total 4584 g, a uma velocidade de 30 a 33 rpm (rotações por minuto). O resultado da amostra de agregado é calculado conforme a equação 14.

$$An = \frac{mn - m'n}{mn} * 100 \qquad \text{onde} \qquad An = \frac{5000 - 2165{,}07}{5000} * 100 = 56{,}69\% \qquad (14)$$

Onde:
An = abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%;
n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;
mn = massa total da amostra seca, colocada na máquina;
m’n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm).

De acordo com Bernucci et al (2010), as especificações brasileiras que determinam a inserção de agregados em camadas de base e revestimento de pavimentos, estabelecem como limite para o valor da abrasão “Los Angeles” (LA) entre 40 e 55%. Para agregados destinados à composição do CBUQ, a norma deste estabelece como valor limite de abrasão de 50%.

Tendo em vista o resultado obtido no ensaio e os parâmetros determinados pela norma, conclui-se que o uso do agregado de mineração para aplicação ao projeto poderia ser utilizado nas camadas de base do pavimento. Para a camada de rolamento com o limite de 50% para o CBUQ e para o PMF deverá ser

atendido fazendo uma composição deste agregado com uma fração de brita graduada.

4.6 Resultado do ensaio de adesividade

O ensaio de adesividade representa a interação elétrica e a capacidade de recobrimento do ligante ao agregado. No presente trabalho foi avaliado o rejeito proveniente do processo de mineração da USIMINAS, no qual apresentou resultados satisfatórios, isto é, em relação a carga do agregado e do ligante. Ressalta-se que na Norma de ensaio prevê uma massa de 17.5g de ligante para 500g de agregado. Porém, durante o ensaio, percebeu-se que essa massa de ligante, que corresponde a 3,5% não fora suficiente para cobrir todos o agregado. Optou-se em aumentar a massa de ligante para um teor de 6,5% de ligante. Este valor foi encontrado experimentalmente. Tal procedimento foi adotado em função da alta absortividade do agregado. Durante o ensaio nota-se que a quantidade de agregado não fora suficiente par ao recobrimento, por ainda conter agregado não molhados pelo CAP. Infere-se sobre este resultado a necessidade de um alto teor de ligante em uma mistura tipo CBUQ ou CAF. Outra inferência deste resultado reporta sobre o volume de poros do agregado. É possível que o agregado de mineração tenha porosidade elevada e com isso demande uma maior quantidade de ligantes para o recobrimento. Este fato será avaliado posteriormente. A Figura 12 mostra o resultado da adesividade do CAP puro sem adição de aditivo recobrindo completamente o agregado.

Figura 12: Aspecto final do agregado após ensaio de adesividade

Fonte: Próprios Autores, 2018.

4.7 Resultados Ensaio Marshall - amostra sem polímeros (a quente)

Os resultados obtidos através do ensaio Marshall na amostra contendo apenas rejeito como agregado mineral na forma que veio ao laboratório, seguem na Tabela 16, nas concentrações de 6,03%, 7,00% e 8,09% de ligante puro sem a adição de polímero. Nestas amostras, o procedimento fora realizado simulando uma mistura de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), em temperaturas de 155º C, e o rompimento feito como um CBUQ.

A Tabela 16 mostra os dados calculados para determinação do teor de ligante usando os parâmetros VV (volume de vazios) e RBV (relação betume vazios). Estes valores são calculados bom base na DMT (densidade máxima teórica), Gmb (densidade aparente do CP), VCB (vazios cobertos de betume) e VAM (vazios do agregado mineral). A Figura 13 mostra o teor de CAP utilizando os parâmetros VV e RBV. Usando a média dos valores centrais do gráfico da

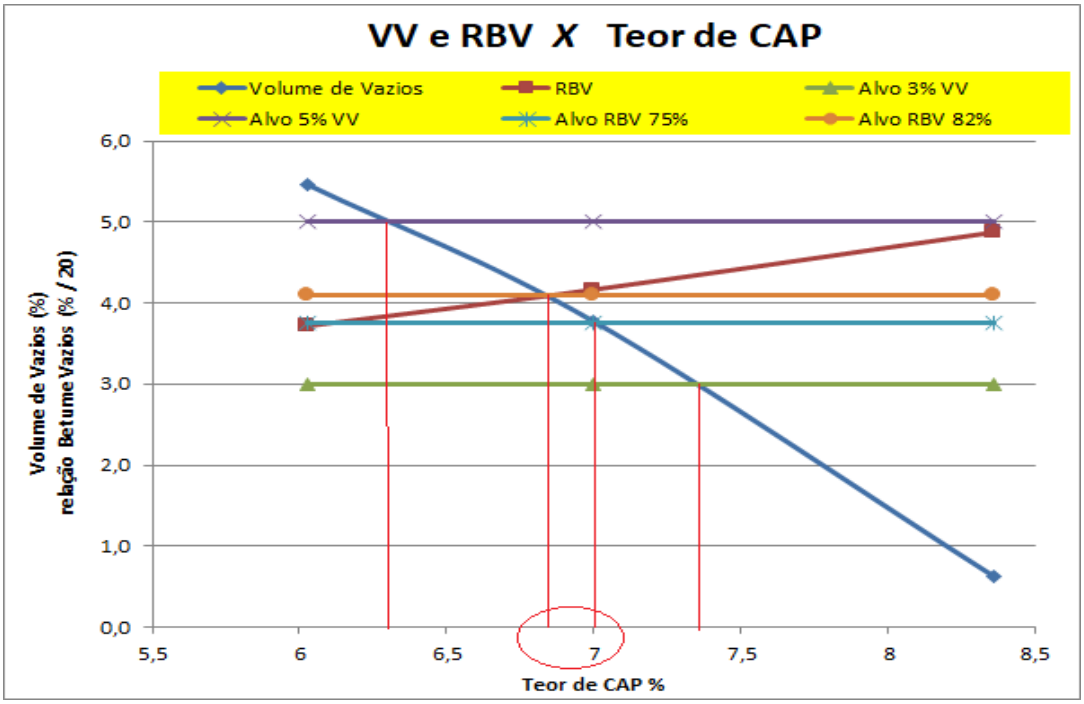
intercessão entre os valores máximos e mínimos de referência, o teor de ligante é de 6,9%. Apenas para melhorar a visualização do gráfico (figura 13), a escala do RBV está reduzida de 20 vezes visando facilitar a visualização no gráfco..

Tabela 16: Ensaio Marshall- Amostras sem polímeros e sem aditivo

Teor de CAP (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)	DMT (g/cm³)	Gmb (g/cm³)	Volume de Vazios (%)	VCB (%)	VAM	RBV
6,03	2956,2	8	2,7543	2,6040	5,46	15,66	21,11	74,16
7,00	1660,9	8	2,7699	2,6653	3,77	18,60	22,37	83,14
8,36	2168,3	7	2,7067	2,6897	0,63	22,42	23,05	97,27

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Figura 13: Gráfico VV e RBV com o teor de CAP



Fonte: Autores Próprios, 2018.

4.8 Resultados Ensaio Marshall Amostra CAFM

Os resultados dos ensaios Marshall com as amostras modificados por polímeros e com aditivos são reportadas na Tabela 18. As amostras foram compostas com 48,5% de brita calcária, visando obter uma interação entre os agregados de

mineração e a brita. Os percentuais por peneiras estão distribuídos na Tabela 17. Observa-se que o maior percentual de adição foi de material fino, uma vez que o objetivo da mistura asfáltica é a fração de agregados na faixa D com alto percentual de finos. Esta opção foi também em função da granulometria do agregado graúdo de rejeito que inicialmente estava na faixa B, e o objetivo do trabalho concentra-se na faixa D do DNIT.

Tabela 17: Percentual de adição por peneira ao agregado de mineração

Abertura das Peneiras	Adição de agregado calcário (%)
9,5 mm	2,94
4,75 mm	10,36
2,0 mm	28,28
0,42 mm	58,42

Fonte: Autores Próprios, 2018.

Os resultados da Tabela 18 indicam que todas as amostras atendem a especificação para estabilidade Marshall comparando a mistura pré misturada a frio – PMF, exceto a amostra com adição de pó de pneu. O processo de incorporação do pó de pneu ao CAP foi pelo processo úmido. É possível que esta interação possa não ter sido como esperado, devido a temperatura de incorporação ou um tempo menor que usual. Conforme Tabela 2, o tempo de incorporação de 90 min. pode ter sido insuficiente, uma vez que as usinas utilizavam tempo próximo a 120 minutos e com temperatura em torno de 180º C.

Tabela 18: Resultado do ensaio Marshall; amostras com polímeros

POLÍMERO	**Gmb (g/cm^3)**	**Estabilidade Marshall (Kgf)**	**Fluência (mm)**
TPE	2,467	440,9	5
SBS	2,353	283,1	7
PEBD	2,319	308,3	7
PÓ DE PNEU	2,309	216,3	2
EVA	2,486	466,9	5
CAP ZERO	2,485	384,5	5

Fonte: Próprios Autores, 2018.

Após a preparação da mistura betuminosa do CAF e após o recálculo, percebe-se que o teor de CAP aplicado fora de 6,5%, isto é, ligeiramente abaixo do teor

de projeto (6,9%). Este fato pode corroborar com pequenos descidos na estabilidade e no valor da fluência.

O volume de vazios esperado para o CAF é abaixo de 4%. O Vv obtido no teor ótimo está em torno de 3,6%, como esperado.

Para verificar o efeito da porosidade do agregado, foi realizado o teste de absorção e densidade do agregado graúdo de mineração. Este ensaio corrobora com as observações obtidas no ensaio de adesividade, onde o percentual de 3,5% da norma foi insuficiente para a conclusão do ensaio, elevando-o para 6,5%. O ensaio de absorção com água segue a norma DNER – ME 081/98 e obteve um resultado de 14,23% conforme equação 15.

$$a = \frac{Psss - Ps}{Ps} x100 = \frac{2490{,}1 - 2179{,}98}{2179{,}98} x100 = 14{,}23\% \quad (15)$$

Onde:

Psss = peso superfície seca saturada; Ps = peso seco em estufa

4.8.1 Valores de referência das misturas quentes e frias.

As Tabelas 19 e 20 apresentam os valores praticados para misturas tipo CBUQ e PMF.

Tabela 19: Especificações de resultados – Ensaio Marshall – a quente

Características	Método de Ensaio	Camadas de Rolamento e Reperfilagem	Camada de Ligação (*Binder*)
Estabilidade mínima, kN (75 golpes no ensaio Marshall	NBR 12891[9]	8	8
Fluência (mm) Fluência (0,01")	NBR 12891[9]	2,0 a 4,0 8 a 16	2,0 a 4,0 8 a 16
% de Vazios Totais		4	4 a 6
Relação Betume Vazios – RBV (%)		65 a 80	65 a 75
Vazios do agregado mineral – VAM (%)		Ver Tabela 4	-
Concentração critica de filer *	ES P00/26[10]	< 90% Cs	< 90% Cs
Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática a 25°C, mínima, MPa	NBR 15087[11]	0,80	0,65
Resistência a danos por umidade induzida, mínimo, %	AASHTO T 283[12]	70	
* a concentração crítica de filer: valor da concentração máxima em volume de filer admitida no sistema filer-asfalto.			

Fonte: ET-DE-P00/027, 2005.

Tabela 20: Especificações de resultados – Ensaio Marshall – pré misturado a frio

ENSAIO	MÉTODO	FREQUÊNCIA	CÁLCULOS ESTATÍSTICOS OU VALORES INDIVIDUAIS	ACEITAÇÃO
Moldagem de, no mínimo 3 corpos-de-prova Marshall, na energia especificada no projeto, para as determinações abaixo:	DNER-ME 107[6]	1 determinação por jornada de 8 h de trabalho	-	-
Estabilidade mín., kN (50 ou 75 golpes no Ensaio Marshall)		1 determinação por jornada de 8 h de trabalho	Controle Unilateral $X = \bar{X} - K_1 S \geq LIE$ Análise de no mínimo 4 e no máximo 10 amostras	PMF aberto 2,5 kN (75 golpes) 1,5 kN (50 golpes) PMF semi-denso e denso 3,5 kN (75 golpes) 2,0 kN (50 golpes)
Fluência		1 determinação por jornada de 8 h de trabalho	Controle Bilateral $X = \bar{X} - K_1 S \geq LIE$ e $X = \bar{X} + K_1 S \leq LSE$ Análise de no mínimo 4 e no máximo 10 amostras	8 a 18 (0,01") 2 a 4,5 (mm)

Fonte: ET-DE-P00/025, 2005.

Contrapondo a norma ET-DE P00, a norma DNER ES 317/97, apresenta um valor de especificação da estabilidade e fluência Marshall para PMF conforme a Tabela 21. Os valores constam do ensaio com de 50 golpes e 75 golpes, sem especificar se a mistura é aberta ou densa.

Tabela 21: Especificação PMF

Porcentagem de vazios	5 a 30
Estabilidade, mínima	250 kgf (75 golpes) 150 kgf (50 golpes)
Fluência, mm.	2,0-4,5

Fonte: Norma DNER ES-317//97, acesso em 2018.

É importante salientar que o CAF não possui especificação de referência no DNIT. Este novo produto ainda carece de legislação brasileira e não temos uma padronização dos valores. A comparação com o PMF é devido ao tipo de mistura mais próxima ao CAF com referência. Os fabricantes de aditivo reportam que a mistura betuminosa com adição de CAF devem possuir estabilidade Marshall superior a 80 Kgf para operações tapa buraco. Neste aspecto, as misturas com polímeros superam os valores recomendados pela Aminocap.

As tabelas foram dispostas neste espaço visando fomentar a discussão das amostras de CBUQ com agregado de mineração e os valores obtidos no CAF

modificado com o valor de PMF. Neste parâmetro, o agregado de mineração tem comportamento próximo a brita graduada de referência para a produção do CBUQ e para a produção do PMF.

Outra observação importante é a que considera-se desejável que na utilização do CAF o teor de finos seja elevado, isto é, esteja nas faixas finas D, E ou F do DNIT, visto que o material seria utilizado em operações tapa buracos e de modo confinado. O contraposto entre o alto teor de absorção devido a porosidade do agregado de mineração e o baixo teor de vazios deve ser controlado pelo aditivo, que reduz a viscosidade do CAP na produção do CAF. Esse fato esclarece também o elevado teor de ligante no projeto, que é de 6,9%.

5 Conclusão

Com base nas Tabelas 19 e 20, retiradas das Normas de Especificação Técnica – Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo, analisa-se que em relação à estabilidade do ensaio Marshall, os CPs feitos como CBUQ apresentaram boa resposta e com valores satisfatórios - acima de 8 kN - o que indica que o agregado advindo de rejeito de mineração se enquadra no que diz respeito à sua resistência para a utilização prevista, embora os valores de abrasão Los Angeles estejam pouco acima do recomendado. Em relação à fluência o valor obtido no ensaio foi superior ao valor determinado na NBR12892, tendo como aceitável. Esses valores podem ser justificados pelo fato de ter sido utilizado uma quantidade de material fino não constante na faixa B durante o teste de CBUQ. É salutar lembrar que estes resultados reportam da amostra pura sem aditivos ou polímeros, o que leva a um potencial de utilização do rejeito de mineração como componente principal na produção do CBUQ.

Nos Corpos de Prova feitos como PMF (pré misturado a frio) e acréscimo de polímeros, o valor de referência estabelecido segundo a norma DNER-ME 107, para misturas com 75 golpes de cada lado e faixa granulométrica densa ou semi densa, o que mais se aproxima da massa asfáltica realizada no ensaio, o valor de estabilidade deve ser superior a 3,5 kN. Porém, estes valores podem ser questionados uma vez que ainda não existem especificações para o CAF. Assim, pode-se concluir que:

- A produção de concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ utilizando 100% do agregado de mineração da USIMINAS com base o ensaio de estabilidade Marshall se mostrou viável e apresentou resistência acima dos limites mínimos estabelecidos pelo DNIT.
- A produção do CAF modificado com os polímeros EVA, TPE, SBS e PEBD com a utilização de 48,5% de agregado calcário com 51,5% com rejeito de mineração e 20% de aditivo Adcap WM atendeu aos parâmetros Marshall do fabricante do aditivo e também a comparação com de referência ao pré misturado a frio – PMF.
- A mistura CAF “zero” sem adição de polímero e com 20% de aditivo na composição com 51,5% de rejeito de mineração superou os parâmetros

iniciais da composição com brita calcária da literatura (Pereira atl al, 2018).

- A utilização do aditivo Aminocap Adcap WS se mostrou satisfatório na produção do CAF modificado pelos polímeros SBS, EVA, pó de pneu, TPE e PEBD, atendendo ao propósito da mistura.
- Os polímeros com maiores respostas a estabilidade Marshall, em ordem, foram: EVA, TPE, PEBD, SBS e pó de pneu, sendo o EVA com 14% e o TPE com 12,8% acima do CAP puro.
- Os polímeros PEBD, SBS e pó de pneu obtiveram valores Marshall abaixo do CAP puro nas mesmas condições de teste.
- Em relação a fluência Marshall, os valores acimados valores de referência inicialmente não implicam em problemas de deformação permanente na via, mas em pontos de atenção para análise futura, visto a faixa fina “D” escolhida para o CAF modificado.

Sugestões de trabalhos futuros:

- Estudo dos agregados de mineração com a fração fina de rejeito e/ou uso da lama na produção do CBUQ.
- Estudo da produção do CAF nas faixas E e F utilizando rejeito na fração fina e lama de mineração sem adição de polímero.
- Estudo de produção de CBUQ utilizando a especificação SUPERPAV e ensaios de resiliência.
- Estudo da produção de CAF com pó de pneu esclarecendo os pontos observados neste trabalho.
- Estudo reológico do CAP com aditivo Adcap WM com adição de polímeros

6 Referências Bibliográficas:

AKCELRUD, L. ***Fundamentos da Ciência dos Polímeros***. Editora Manole Ltda., São Paulo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água – Requisitos***. Rio de Janeiro, RJ. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 13029: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha***. Rio de Janeiro, RJ. 2017.

BERNUCCI, Liede B.; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B.; ***Pavimentação Asfáltica – Formação Básica Para Engenheiros*****,** Ed ABEDA, Rio de Janeiro, 2010.

BERTOLLO, Sandra A.M; BERNUCCI, Liede. B; FERNANDES, Jose. L; LEITE, Leni F.M. ***Mechanical properties of asphalt mixtures using recycled tire rubber produced in Brazil* – a laboratory evaluation.** Washingto**n**, DC: Transportation Research Board, 2003.

AMARAL, Simonne da Costa. ***ESTUDOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM AGREGADOS DO ESTADO DO PARÁ, UTILIZANDO ASFALTO CONVENCIONAL (CAP-40) E ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMERO SBS (BETUFLEX B 65/*60).** Dissertação de Mestrado. São Carlos, SP. 2000.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. ***Política Nacional de Resíduos Sólidos***. Brasília, DF. Agosto. 2010.

BRASKEM, S.A. ***Glossário de termos aplicados a polímeros***. Disponível em: http://www.braskem.com.br/upload/portal_braskem/pt/produtos_e_servicos/boletins/Gloss%C3%A1rio_de_termos_aplicados_a_pol%C3%ADmeros.pdf. Acesso em: 30 de a abril de 018.

CALLISTER Jr., W. D. - **"Ciência e engenharia de materiais: uma introdução",** Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 2002.

CAETANO, Mario. ***Solventes e Parâmetros de Solubilidade***. [2010-2014]. Disponível em: <https://ctborracha.com/?page_id=6723>. Acesso em: 20 jun. 2018

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Ag***regado graúdo - Adesividade a ligante betuminoso***. Norma Rodoviária. DNER – ME 078/94. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ***Agregados – determinação da abrasão "Los Angeles"***. Norma Rodoviária. DNER – EM 035/98. Rio de Janeiro, RJ. 1998..

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ***Cimento Asfáltico Modificado Por Polímero.*** Norma Rodoviária. DNER – EM 396/99. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ***Equivalente de areia***. Norma Rodoviária. DNER – EM 054/97. Rio de Janeiro, RJ. 1997.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ***Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall***. Norma Rodoviária. DNER – ME 107/94. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ***Mistura betuminosa a quente – ensaio Marshall***. Norma Rodoviária. DNER – ME 043/95. Rio de Janeiro, RJ. 1995.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ***Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas***. Norma Rodoviária. DNER – EM 129/94. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Solos* – ***Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas***. Norma Rodoviária. DNER – EM 049/94. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. ***DNIT 155/2010: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio***. Rio de Janeiro, p.3. 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *DNIT 155/2010:* ***Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio***. Rio de Janeiro, p.2-3. 2010.

ET – Especificação Técnica. Departamento de Estradas de Rodagem. Concreto Asfáltico. ***ET – DE – P00/025*.** São Paulo, SP. 2005. Disponível em: < ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-025_A.pdf>. Acesso em 08 de novembro de 2018.

ET – Especificação Técnica. Departamento de Estradas de Rodagem. Concreto Asfáltico. ***ET – DE – P00/027***. São Paulo, SP. 2005. Disponível em: < ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-027_A.pdf>. Acesso em 08 de novembro de 2018.

FELDMAN, D. e Barbalata, ***A Synthetic Polymers technology properties applications***. Artigo. 1 Ed., London, Chapman & Hall, 1996.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas (2018). ***A Classe de Polímeros dos Elastômeros***. Site. Acesso em 02 de março de 2018. Disponível em: http://alunosonline.uol.com.br/quimica/a-classe-polimeros-dos-elastomeros.html

HEITZMAN, M. ***Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier*.** Transp. Rese. Rec., TRB, Washington, DC, n.1339, p.01-08, 1992.

HICKS, R.G. et al. ***Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement***: Summary of Practices in Arizona, California, and Florida. FHWA-SA-95-056. September, 1995.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. ***Relatório anual***. 2011.

International Workshop | Advances in Cleaner Production – Academic Work, 5. 2015. São Paulo. ***CLEANER PRODUCTION TOWARDS A SUSTAINABLE TRANSITION*.** São Paulo, Universidade Paulista, 2015.

KRATON POLYMERS- LLC. ***Modificadores de Alto Desempenho Para Pavimentação Asfáltica***. Documento informativo. Paulínia, São Paulo – 2011.

LEITE, L.F.M. ***Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros***. 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LUCENA, Maria da Conceição Cavalcante. ***Caracterização Química e Reológica de Asfaltos Modificados por Polímeros***. 2005. 186 p. Universidade Federal DO Ceará - UFCE, Fortaleza, 2005.

MACHADO, M. L. C. ***Estudo das propriedades mecânicas e térmicas do polímero poli-3-hidroxibutirato (PHB) e de compósitos PHB/pó de madeira***. Artigo. Mackenzie, Polímeros: Ciência e Tecnologia. São Paulo, 2009.

MANO, E.B. ***Introdução a polímeros***. Livro. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1985.

MANO, E.B. ***Polímeros, produção e aplicação***. Livro. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1991.

MANOEL, G. F.; **Caracterização Físico-química e Estudo Reológico de Asfaltos Modificados pelos Polímeros PEAD, PEBD, PELBD e Contribuição ao Estudo do envelhecimento do Cimento Asfáltico de Petróleo;** Tese – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015

McQUILLEN, JR., J.L. et al. ***Economic analysis of rubbermodified asphalt mixes***. J. Transp. Eng., Reston, v.114, n.3, p.259-277, 1988.

MENEZES, R.R., FILHO, J.F., FERREIRA, H.S., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C. ***Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas***. Revista Cerâmica – 2009.

MOIRIN, Stephane. ***A brief history of elastomers***. Artigo. Disponível em: https://knowledge.ulprospector.com/1370/pe-brief-history-of-elastomers/. Acesso em: 05/05/2018.

MOREIRA, Helion França. ***O Desenvolvimento Sustentável no Contexto do Setor Mineral Brasileiro.*** Monografia de Pós-Graduação. Rio de Janeiro, RJ. 2002.

MORILHA, Armando Jr. ***Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de***

fadiga das misturas asfálticas. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NBR 15184. Materiais betuminosos - ***Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional***. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Rio de Janeiro, 2004.

Norma rodoviária, DNER-ME 083/98 - ***Método de Ensaio: Ensaio de Agregados – análise granulométrica.*** Rio de Janeiro, RJ.1998.

NORMA DNIT 031/2006. ***Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico*** - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, RJ.2006.

ODA, Sandra; JÚNIOR, José L. F. ***Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação***. Acta Scientiarum, Maringá-PR, v. 23, n. 6, p. 15-1599, maio. 2001.

OLIVEIRA, Aléxia G. B. de. ***Estudos preliminares de mistura asfáltica do tipo CBUQ estocável para uso em pavimentação no estado de Goiás***. 2017. 64 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

OLIVEIRA, Arthur Augusto Rocha; CORRÊA, Bruna Miranda dos Reis; FRANÇA, Sthefany Marques. ***PRODUÇÃO DE PAVERS A PARTIR DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO.*** 2018. 37 p. Dissertação (Graduação em Engenharia Química). PUC Minas, Belo Horizonte, 2018.

PEREIRA, A. L. R.; SANTANA, C. S.; COSTA, I. L. R.; VIEIRA, L. M. P.; GUIMARAES, M. A. F.; SENA, N. F.; **ESTUDO DO MATERIAL FRESADO DA PAVIMENTAÇÃO COM ADITIVO PARA CBUQ APLICADO A FRIO- CAFr,** Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Civil – PUC Minas, Belo Horizonte, 2018

PEROZZO, Alana. FRITZ, Igor Matheus de Melo. CEZAR, Pedro Henrique. ***Sistemas de Contenção para rejeitos: Barragens.*** Dissertação. Cascavel. PR. 2016.

PUREZA, J.C.C., VICENZI, J., BERGMANN, C.P., ***Utilização de Resíduos de Baixa Granulometria como Matéria-Prima na Produção de Cerâmica Vermelha: Considerações quanto aos Mecanismos de Sinterização***. Revista Cerâmica Industrial – 2007.

RESINEX. ***TPE – ELASTÓMEROS TERMOPLÁSTICOS***. Website. Disponível em: <http://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/tpe.html>. Acesso em 20 de abril de 2018.

RUTH B.E. et al*.* ***Recycling of asphalt mixtures containing crumb rubber***. Final Report. FL/DOT/MO D510717. Florida: University of Florida. Florida Department of Transportation, 1997.

SALTER, R.J.; MAT, J*. Some* ***effects of rubber additives on asphalt mixes*****.** Transp. Res. Rec., Washington, D.C., n.1269, p.79-86, 1990.

SAMARCO. ***Aproveitamento de Rejeitos***. Site. Disponível em: < https://www.samarco.com/aproveitamento-de-rejeitos/>. Acesso em: 10 de novembro de 2018.

SANTANA, A.C.S.T. ***Análise das Propriedades Físicas e Mecânicas de Mistura Asfáltica Usinada à Quente Ensacada para Aplicação à Frio***. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil. São Cristóvão: UFS, 2016.

SARAIVA, Sérgio Luiz Costa. ***Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da estrutura de Pavimentos Rodoviários***. Dissertação de Mestrado Geotecnia. Ouro Preto, MG. 2006.

SHINOHARA, Keyla Junko; MOMM, Leto; LEANDRO, Greice Cadorim; BARRA, Salgado Breno; PÉREZ, Yader A. Guerrero. *Avaliação do Efeito da* ***Adição do Polímero EVA nas Propriedades do Ligante Asfáltico 50/70***. Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, 2015.

STEPHENS, J.E. ***Field evaluation of rubber-modified bituminous*** *concrete*. Transp. Res. Rec., Washington, D.C., n.843, p.11-21, 1982.

TAKALLOU, H.B.; HICKS, R.G. **Development of improved mix and construction guidelines for rubbermodified asphalt pavements**. Transp. Res. Rec., Washington, D.C., n.1171, p.113-120, 1988.

VILLA, Ricardo; DE OLIVEIRA; Adriana P; NOGUEIRA, Raquel F. Pupo. **Avaliação dos parâmetros de solubilidade de Hildebrand/Hansen na seleção de solventes para a extração de pesticidas organoclorados do solo.** Quim. Nova, Vol. 34, No. 9, 1501-1506. São Paulo, 2011.

WASILKOSKI, C. Maria. **CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ANÁLISE DINÂMICO-MECÂNICA E COMPARAÇÃO COM A ANÁLISE POR IMPEDÂNCIA DIELÉTRICA**. 117p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.