

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CRISTIANO TOMAZELLI

**PRODUÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO COM ADIÇÃO
DE RESÍDUOS PLÁSTICOS**

São Leopoldo
2019

CRISTIANO TOMAZELLI

**PRODUÇÃO DE CONCRETO ASFÁLTICO COM ADIÇÃO
DE RESÍDUOS PLÁSTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Professor Me. Fabiano da Silva Jorge

São Leopoldo
2019

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância”
(KENNEDY, 1962).

RESUMO

Visando encontrar alternativas para a reutilização de resíduos plásticos e melhorar o comportamento mecânico dos pavimentos, este trabalho investigou os efeitos da adição de resíduos plásticos no concreto asfáltico (CA). Foram realizados ensaios, em laboratório, de caracterização dos agregados utilizados nas misturas e através da dosagem Marshall foi determinado o teor ótimo de projeto e, então, confeccionados dois tipos de misturas asfálticas (convencional e com adição de resíduos plásticos), foram realizados ensaios físicos (volume de vazios e densidades) e também ensaios mecânicos (estabilidade, fluência e resistência à tração) com o intuito de comparar os resultados. Partindo de uma amostra de referência, confeccionou-se misturas asfálticas modificadas com resíduos plásticos, via processo seco, nas proporções de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% e 2,5% em relação ao peso da mistura. Observou-se uma contribuição positiva no comportamento mecânico da massa asfáltica aditivada com resíduos e o atendimento completo dos parâmetros normativos.

Palavras-chave: Resíduos Plásticos. Concreto Asfáltico. Agregados. Dosagem Marshall.

ABSTRACT

In order to find some alternatives for the reuse of plastic waste and to improve the mechanical behavior of the pavements, this job investigated the effects of the addition of plastic waste in the Asphalt Concrete (AC). Laboratory tests were performed to characterize the aggregates used in the mixtures and through of the Marshall mix design method selected the optimum asphalt binder content, than made two types of the asphalt mixtures (conventional and with addition of plastic waste), carry out physical tests (Void Volume and Specific Gravities) and mechanical tests (Stability, Fluency and Tensile Strength) with the intention of comparing the results. From a reference sample, conceived modified asphalt mixtures with plastic waste were made at the dry process, with the proportions of 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% and 2,5 % in relation of the mixture weight. A positive contribution was observed in the asphalt mixture mechanical behavior with the residues added and the complete compliance with the normative parameters.

Keywords: Plastic Waste. Asphalt Concrete. Aggregates. Marshall mix design.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Estrutura dos pavimentos flexíveis..... | 15 |
| Figura 2 – Estrutura dos pavimentos rígidos..... | 15 |
| Figura 3 – Rodovia com revestimento asfáltico..... | 17 |
| Figura 4 – Tipos de rochas..... | 21 |
| Figura 5 – Estrutura do poliestireno..... | 24 |
| Figura 6 – Módulo de Young vs temperatura..... | 25 |
| Figura 7 – Nomenclatura seletiva dos plásticos..... | 25 |
| Figura 8 – Garrafas PET..... | 26 |
| Figura 9 – Embalagens plásticas..... | 27 |
| Figura 10 – Lonas plásticas..... | 27 |
| Figura 11 – Tubos e conexões..... | 28 |
| Figura 12 – Engradados de bebidas..... | 28 |
| Figura 13 – Equipamentos para alta temperatura..... | 29 |
| Figura 14 – Laminas de EVA..... | 29 |
| Figura 15 – Brinquedos..... | 30 |
| Figura 16 – Telhas coloridas..... | 30 |
| Figura 17 – Peças automotivas..... | 31 |
| Figura 18 – Mangueiras e tubos flexíveis..... | 31 |
| Figura 19 – Fluxograma..... | 33 |
| Figura 20 – Agregados..... | 34 |
| Figura 21 – Dosagem dos Agregados..... | 39 |
| Figura 22 – Mistura e Compactação do CA..... | 40 |
| Figura 23 – CP's de dosagem e pesagem hidrostática..... | 40 |
| Figura 24 – Esquema do ensaio de RT por compressão diametral..... | 46 |
| Figura 25 – Resíduos e triturados..... | 47 |
| Figura 26 – Densidade específica dos polímeros..... | 48 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Série de peneiras | 22 |
| Tabela 2 – Faixas granulométricas do DNIT | 35 |
| Tabela 3 – Massa mínima da amostra de ensaio | 35 |
| Tabela 4 – Massa e absorção dos agregados..... | 38 |
| Tabela 5 – Limites mínimos de VAM..... | 43 |
| Tabela 6 – Parâmetros Normativos | 44 |
| Tabela 7 – Dosagem Convencional | 50 |
| Tabela 8 – Dosagem Marshall Convencional | 50 |
| Tabela 9 – Dosagem de RP | 54 |
| Tabela 10 – Dosagem Marshall de RP..... | 54 |
| Tabela 11 – Comparativo dos Resultados | 58 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Teor de asfalto <i>versus</i> Vv x RBV | 45 |
| Gráfico 2 – Curva granulométrica da mistura | 49 |
| Gráfico 3 – Massa Específica Aparente | 51 |
| Gráfico 4 – Vazios do Agregado Mineral (VAM) | 51 |
| Gráfico 5 – Volume de Vazios (VV) | 52 |
| Gráfico 6 – Relação Betume/Vazios (RBV) | 52 |
| Gráfico 7 – Estabilidade | 52 |
| Gráfico 8 – Fluência | 52 |
| Gráfico 9 – Teor de CAP <i>versus</i> Vv e RBV | 53 |
| Gráfico 10 – Massa Específica Aparente | 55 |
| Gráfico 11 – Vazios do Agregado Mineral (VAM) | 55 |
| Gráfico 12 – Volume de Vazios (VV) | 56 |
| Gráfico 13 – Relação Betume/Vazios (RBV) | 56 |
| Gráfico 14 – Estabilidade | 56 |
| Gráfico 15 – Fluência | 57 |
| Gráfico 16 – Teor de CAP <i>versus</i> Vv e RBV | 57 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|---|
| ABS | Acrilonitrila-butadieno-estireno |
| CA | Concreto Asfáltico |
| CAP | Cimento Asfáltico de Petróleo |
| CD's | Discos Compactos |
| CPs | Corpos de Prova |
| DMT | Densidade Máxima Teórica |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte |
| EAP | Emulsão Asfáltica de Petróleo |
| EVA | Etileno Vinil Acetato |
| Gmb | Massa Específica Aparente |
| LMCC | Laboratório de Materiais de Construção Civil |
| PA | Poliamidas |
| PC | Policarbonato |
| PE | Polietileno |
| PEAD | Polietilenos de Alta Densidade |
| PEBD | Polietileno de Baixa Densidade |
| PET | Politereftalato de Butileno |
| PP | Polipropileno |
| PS | Poliestireno |
| PU | Poliuretano |
| PVC | Policloreto de Vinila |
| RBV | Relação Betume/Vazios |
| RP | Resíduo Plástico |
| Tc | Temperatura de Cristalização |
| Tg | Temperatura de Transição Vítria |
| Tm | Temperatura de Fusão Cristalina |
| TOP | Teor Ótimo de Projeto |
| VAM | Vazios do Agregado Mineral |
| VCB | Vazios com Betume |
| VICAT | Temperatura de Amolecimento |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|--------------------------------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Delimitações do Trabalho | 11 |
| 1.2 | Problema de Pesquisa | Erro! Indicador não definido. |
| 1.3 | Objetivos | 12 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 12 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 13 |
| 1.3.3 | Justificativa | 13 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 2.1 | Pavimento Asfáltico | 14 |
| 2.2 | Revestimento Asfáltico | 16 |
| 2.3 | Ligante Asfáltico | 18 |
| 2.4 | Asfaltos Modificados | 18 |
| 2.5 | Agregados | 20 |
| 2.5.1 | Classificação dos Agregados | 20 |
| 2.5.2 | Classificação dos Agregados Quanto ao Tamanho | 22 |
| 2.6 | Plásticos | 23 |
| 2.7 | Resíduos Plásticos no Concreto Asfáltico | 32 |
| 3 | METODOLOGIA | 33 |
| 3.1 | Fluxograma | 33 |
| 3.2 | Caracterização dos Insumos para Concreto Asfáltico | 34 |
| 3.2.1 | Granulometria dos Agregados | 34 |
| 3.2.2 | Absorção e Densidade dos Agregados | 36 |
| 3.3 | Dosagem Marshall | 38 |
| 3.4 | Ensaio Físicos | 40 |
| 3.4.1 | Densidade Máxima Teórica (DMT) | 41 |
| 3.4.2 | Volume de Vazios | 41 |
| 3.4.3 | Vazios com Betume | 42 |
| 3.4.4 | Vazios do Agregado Mineral | 42 |
| 3.4.5 | Relação Betume/Vazios | 43 |
| 3.5 | Determinação do Teor de Projeto | 44 |
| 3.6 | Ensaio Mecânicos | 45 |
| 3.6.1 | Ensaio Marshall – Estabilidade e Fluência | 45 |
| 3.6.2 | Resistência à Tração | 46 |
| 3.7 | Caracterização dos Resíduos Plásticos | 46 |
| 3.8 | Dosagem Marshall com Adições de Resíduos | 48 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 49 |
| 4.1 | Análise Granulométrica | 49 |
| 4.2 | Dosagem Marshall de Referência | 50 |
| 4.3 | Parâmetros Físicos e Mecânicos dos CP's de Referência | 50 |
| 4.4 | Determinação do Teor Ótimo de Projeto de Referência | 53 |
| 4.5 | Dosagem Marshall com Adição de Resíduo Plástico | 53 |
| 4.6 | Parâmetros Físicos e Mecânicos dos CP's com adição de RP | 54 |
| 4.7 | Determinação do Teor Ótimo de Resíduo Plástico | 57 |
| 4.8 | Resultados Finais | 58 |

| | |
|--|-----------|
| 5 CONCLUSÕES | 60 |
| 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros..... | 61 |
| REFERÊNCIAS..... | 62 |
| ANEXO A – VISCOSIDADE | 67 |
| APÊNDICE A – DADOS DA DOSAGEM MARSHALL DE REFERÊNCIA | 68 |
| APÊNDICE B – DADOS DA DOSAGEM MARSHALL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO PLÁSTICO | 69 |
| APÊNDICE C – TABELA DE GRANULOMETRIA DA MISTURA..... | 70 |
| APÊNDICE D – REGISTRO FOTOGRÁFICO DOS ENSAIOS NO LABORATÓRIO | 71 |

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com enorme extensão territorial e com milhares de quilômetros de rodovias utilizadas na movimentação de pessoas e de cargas. As rodovias pavimentadas, em sua grande maioria, são revestidas com concreto asfáltico (CA), produto que sofre constantemente aprimoramentos para que haja melhor desempenho, principalmente na questão de durabilidade.

Outro problema, não só do Brasil, mas mundial, é o aumento de diversos tipos de produtos plásticos. O descarte inadequado desses resíduos tem causado incalculáveis impactos ambientais. Para minimizar isso, além da necessidade de estabelecer um uso mais racional desse tipo de produto, a reutilização é a forma mais eficiente de sustentabilidade.

Segundo Félix (2009), o lançamento inadequado de resíduo plástico na natureza, contribui fortemente para a poluição e degradação do meio ambiente, ao mesmo tempo, é complexo e normalmente inviável o processo de reciclagem pelo fato de se tornarem infusíveis e insolúveis quando aquecidos.

A reutilização de resíduos plásticos na produção de CA é uma alternativa de minimizar os impactos ambientais causados pela exposição desse material na natureza, além de se buscar atender os parâmetros normativos das propriedades mecânicas e físicas com a inserção destes resíduos.

1.1 Delimitações do Trabalho

Investigar o desempenho do concreto asfáltico com adição, via processo seco, de resíduos plásticos, nos percentuais de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, exceto PEBD e outros, objeto de descarte. O trabalho será delimitado aos desempenhos físicos e mecânicos previstos nas Normas DNIT 031-ES (2006) e DNER-ES 385 (1999).

1.2 Problema de Pesquisa

Plásticos estão presentes em diversos segmentos, tais como em produtos automobilísticos, eletrônicos, eletrodomésticos, industriais, embalagens de alimentos e cosméticos. Com o aumento significativo da utilização, cresce também o volume

de resíduos plásticos descartados, corretamente ou não, causando grandes prejuízos ambientais. O descarte desses resíduos possui um alto custo para os municípios, pois a maior parte deles precisa ser transportada para aterros em outras cidades.

Em outro cenário, há uma perquirição por componentes que melhorem o desempenho dos revestimentos asfálticos, objetivando reduzir custos de manutenção. Porém, normalmente, esses aditivos oneram o custo de produção, logo, utilizar resíduos plásticos pode ser uma alternativa economicamente interessante.

Segundo Mendes e Nunes (2009) os asfaltos modificados com borracha, por exemplo, são em média, 30% mais caros do que asfaltos convencionais. Observam que isso depende também do porte da obra e do orçamento envolvido. Consideram que o custo elevado se deve a tecnologia empregada e que o valor pode diminuir com o passar do tempo, afirmam que pode ser mais caro no início, mas o custo-benefício é bem maior ao longo do tempo.

Para Wiebeck e Harada (2005) a reciclagem é a alternativa mais eficiente para diminuir o impacto ambiental causado pelo descarte de resíduos plásticos.

Tendo em vista os dois reveses citados anteriormente, tornou-se oportuno pesquisar alternativas sustentáveis e econômicas para diminuir custos de produção e minimizar impactos ambientais causados pelo descarte dos resíduos. Também como forma de compensação ambiental de mineradoras que extraem rochas para produção de agregados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a utilização de resíduos plásticos na produção de Concreto Asfáltico, atendendo todos os parâmetros normativos das propriedades mecânicas e físicas do concreto asfáltico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Confeccionar uma mistura asfáltica convencional de referência através da dosagem Marshall e obter os parâmetros mecânicos (fluência, estabilidade e resistência à tração) e os físicos (volume de vazios, densidades);
- b) Definir quais resíduos plásticos serão utilizados na produção de CA;
- c) Confeccionar uma mistura asfáltica com a adição de resíduo plástico (RP) através da dosagem Marshall e obter os parâmetros mecânicos (fluência, estabilidade e resistência à tração) e os físicos (volume de vazios e densidades);
- d) Analisar os resultados obtidos para o CA convencional e para o CA com adição de RP, quanto aos parâmetros físicos e mecânicos, a fim de avaliar a utilização dos resíduos plásticos nestas misturas.

1.3.3 Justificativa

Tendo em vista os dois reveses citados no item problema de pesquisa, tornou-se oportuno pesquisar alternativas sustentáveis e econômicas para diminuir custos de produção e minimizar impactos ambientais causados pelo descarte dos resíduos. Também como forma de compensação ambiental de mineradoras que extraem rochas para produção de agregados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, abordam-se alguns conceitos importantes, descritos por diversos autores, sobre o objetivo de estudo desse trabalho.

Para melhorar o entendimento do processo aqui sugerido, primeiramente, faz-se necessário o estudo mais minucioso da estrutura e dos materiais regularmente utilizados no pavimento, diferentes tipos de polímeros e suas principais características.

2.1 Pavimento Asfáltico

As estradas foram criadas pelo homem para facilitar os acessos às áreas de seu interesse, como plantações, fontes de água e minérios, galgar montanhas e interligar localidades. Romanos aperfeiçoaram esses acessos com calçamento e drenagem, com o objetivo de torná-los mais duradouros. Obras civis de pavimentação têm como objetivo principal propiciar mais conforto e segurança aos usuários, reduzindo custos de deslocamentos, permitindo velocidades maiores e minimizando despesas com manutenção (BALBO, 2007).

Sobre pavimento, o autor citado acima, afirma:

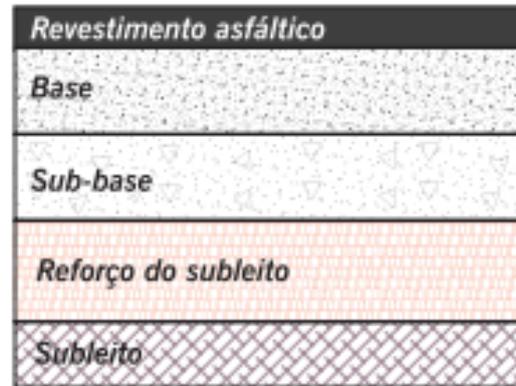
O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios (BALBO, 2007, p. 37).

Para Bernucci et al. (2006), a função do pavimento asfáltico é contribuir com o conforto de rolamento e segurança viária ao tráfego, também de fazer o ligamento entre agregados evitando o seu deslocamento relativo, impermeabilizando o pavimento.

Balbo (2007) classifica os pavimentos asfálticos em três principais tipos: pavimento flexível, semirrígido e rígido:

- a) pavimento flexível: os esforços neste tipo de pavimento são absorvidos e dissipados em diversas camadas sobrepostas, sendo mais concentradas nas proximidades das regiões onde as cargas se aplicam, conforme representa a Figura 1;

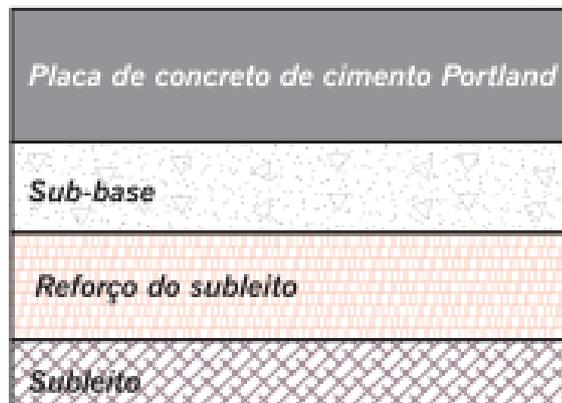
Figura 1 – Estrutura dos pavimentos flexíveis



Fonte: Bernucci et al. (2006).

- b) pavimento semirrígido: possui camadas de base ou sub-base reforçadas com cimento, elevando sua rigidez, mesmo com a ausência de concreto;
- c) pavimento rígido: composto por uma consistente placa superficial a qual recebe grande parte dos esforços horizontais solicitantes e transferindo aliviadas pressões para as camadas inferiores, conforme representa a Figura 2.

Figura 2 – Estrutura dos pavimentos rígidos



Fonte: Bernucci et al. (2006).

Para Balbo (2007), o pavimento é estruturado em camadas sobrepostas, iniciando pelo subleito, reforço de subleito, sub-base, base e revestimento. As camadas são descritas da seguinte forma:

- a) subleito: solo natural da região, escavado, nivelado e compactado;
- b) reforço de subleito: utilizado quando o subleito não suporta as cargas de projeto, então, executa-se camada de espessura constante;

- c) sub-base: usualmente executada para diminuir custos, é a camada que complementa a camada de base com características técnicas inferiores;
- d) base: faixa de extrema importância na estrutura do pavimento, pois absorve esforços mecânicos oriundos das cargas de utilização e também das reações de fundação dessas cargas;
- e) revestimento: capa impermeável que possibilita maior conforto e segurança à pista de rodagem. Cargas verticais e horizontais provenientes do tráfego de veículos são absorvidas e transmitidas para as camadas subjacentes.

No Brasil, a maioria das estradas pavimentadas possui revestimento flexível, que tem como função garantir impermeabilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem e fadiga.

Agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (filer) e ligante asfáltico são os materiais utilizados no concreto asfáltico (DNIT 031 – ES 2006 –ES).

2.2 Revestimento Asfáltico

Bernucci et al. (2006) definem o asfalto utilizado em revestimentos como um composto de agregados e ligante betuminoso, que é originário da destilação do petróleo e que tem a característica de ser um aglutinante termoviscoso plástico, impermeável e pouco reativo, convencionalmente chamado de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

Para Balbo (2007), betumes são substâncias formadas por hidrocarbonetos, com característica glutinosa, inflamável e em temperatura ambiente possui grande viscosidade.

Concreto Asfáltico é:

[...] uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto para o local (BERNUCCI et al., 2006, p. 157).

Segundo Balbo (2007), revestimento é a camada externa que recebe as cargas de rodagem e entra permanentemente em contato com ações ambientais.

Sua composição requer materiais resistentes e bem unificados para que não haja deslocamentos horizontais. A mistura asfáltica é um composto viscoelastoplástico e termoplástico, ou seja, a elasticidade da mistura se modifica em função da temperatura. Compostos de betume convencional atingem o ponto de amolecimento, ou seja, entra em fluxo viscoso, em aproximadamente 65°C. Por outro lado, a baixa temperatura faz com que a mistura entre em fase de vitrificação, enfraquecendo o revestimento, tornando-a quebradiça.

O contato com o ar e a água faz com que haja uma degradação lenta por meio de oxidação. Também informa que a classificação do revestimento é em função do tipo de ligante. Utiliza-se o CAP para misturas a quente e Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) para misturas a frio. Para a fabricação dessas massas asfálticas, são utilizadas usinas específicas, fixas ou móveis, ou ainda no próprio local da obra (BERNUCCI et al., 2006). A Figura 3 apresenta uma rodovia com revestimento asfáltico.

Figura 3 – Rodovia com revestimento asfáltico



Fonte: RODOCON (2019).

Atualmente, é imprescindível a busca por melhorias nos pavimentos asfálticos devido ao aumento considerável no número da frota de veículos que utilizam as rodovias brasileiras. De acordo com o Ranking de qualidade das rodovias dos países da América do Sul – 2016, o Brasil encontra-se na 111ª posição, e essa situação é agravada pela elevada sobrecarga gerada pelos caminhões. Outra questão, é o pouco investimento na manutenção e conservação das estradas,

contribuindo crescentemente para a degradação das estradas brasileiras (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2018).

Segundo Balbo (2007), o pavimento exibirá sempre lapsos decorrentes de esforços mecânicos variados e, ainda mais relevante, a correlação com os materiais empregados no composto utilizado na estrutura. A observação das imperfeições referencia aos engenheiros à manutenção mais apropriada para cada caso.

Os asfaltos convencionais tendem satisfazer plenamente os requisitos fundamentais para resistir ao tráfego e ao clima, porém, para obter maior resistência aos efeitos da grande variação térmica e do tráfego pesado em rodovias especiais, se faz cada vez mais necessário o uso de modificadores das propriedades do asfalto (BERNUCCI et al., 2006).

2.3 Ligante Asfáltico

A Norma DNIT 095/2006 – EM, classifica os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) conforme sua procedência:

- a) CAP-30/45;
- b) CAP-50/70;
- c) CAP-85/100;
- d) CAP-150/200.

A maior parte da produção brasileira de asfalto é feita pela Petrobras, que possui diversos centros de produção e distribuição.

2.4 Asfaltos Modificados

De acordo com Arao (2016), a mistura asfáltica é composta por agregados e ligante betuminoso e, em comparação com outros componentes utilizados na construção civil, possui um sensível comportamento, tem-se procurado, então, formas de melhorar o desempenho do concreto betuminoso. Com este objetivo, podem ser misturados polímeros na mistura de CA ou ainda no próprio ligante.

As características do composto asfáltico modificado dependem do teor e do tipo de polímero aplicado. São geralmente aplicados um teor de 4 a 6% do peso em relação ao asfalto, porque, economicamente, teores maiores são considerados inviáveis e também porque podem apresentar problemas nas propriedades do

asfalto. Os polímeros aplicáveis podem ser agrupados em três principais categorias: elastômeros termoplásticos, polímeros e polímeros reativos. Os elastômeros termoplásticos são utilizados para melhorar o comportamento elástico, já para reduzir as deformações das cargas e aumentar a rigidez são misturados polímeros e polímeros reativos (POLACCO et al., 2004).

Segundo Félix (2009), ao combinar determinados tipos de polímeros na massa asfáltica pode-se prevenir a degradação prematura do pavimento, aumentando sua vida útil e reduzindo, assim, o custo de manutenção.

Os asfaltos modificados por polímeros melhoram consideravelmente as características físicas e mecânicas dos pavimentos flexíveis, reduzindo as deformações permanentes, trincas devido à variação térmica e fadiga causadas pelas grandes cargas de tráfego. Além disso, auxilia ainda na adesividade entre betume e agregado. Se comparados aos materiais utilizados em misturas convencionais, o custo dos polímeros é muito mais elevado, fazendo com que a quantidade utilizada seja a menor possível, mesmo com todas as vantagens incrementadas no revestimento. Dessa forma, pode-se perceber que existe uma tendência crescente em substituir os polímeros comerciais por polímeros reciclados, como borrachas de pneus inutilizáveis e resíduos de garrafas PET (SULYMAN; HAPONIUK; FORMELA, 2016).

Segundo Sulyman, Haponiuk e Formela (2016), o PET é um material inerte, com boa resistência mecânica e por possuir estabilidade química, a utilização em misturas asfálticas desse tipo de resíduo pode trazer vários benefícios. Muito embora, seja um tópico ainda pouco estudado, ele se mostra uma medida promissora para um melhor desempenho do Concreto Asfáltico do ponto de vista ambiental e econômico, pois existem semelhanças entre o desempenho de polímeros reciclados e polímeros virgens em asfalto modificado (SULYMAN; HAPONIUK; FORMELA, 2016).

Shedame e Pilate (2014) produziram em laboratório concreto betuminoso utilizando resíduos plásticos na composição, buscando melhorar sua característica, foram substituídas 0,76% em peso de agregado e 3% de enchimento, conforme os autores descrevem o experimento, essas substituições resultaram na melhora significativa do desempenho mecânico do revestimento e aumento do ponto de amolecimento, dando, assim, maior resistência à elevadas temperaturas.

2.5 Agregados

Agregado é um termo usado para areias, pedregulhos e rochas minerais em estado natural ou britadas. O agregado, utilizado na pavimentação asfáltica, deve ser capaz de suportar as tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. Com a intenção de prever o comportamento dos agregados utilizados no concreto asfáltico sobre o efeito do tráfego, faz-se necessário uma série de ensaios laboratoriais (BERNUCCI et al., 2006).

2.5.1 Classificação dos Agregados

Bernucci et al. (2006) traz uma classificação de agregado para a pavimentação, de acordo com sua natureza, tamanho e granulometria.

Classificação quanto à natureza:

- a) agregados naturais: são todas de fonte de ocorrência natural, constituídos por minerais distintos, com composições variáveis. São obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem. Alguns exemplos são os pedregulhos, britas, seixos e as areias. Podendo ser utilizados na pavimentação, na forma e tamanho que se encontram na natureza, ou, quando necessário, podem passar pelo processo de britagem;

A Figura 4 apresenta os tipos de rochas comumente utilizados como agregados na pavimentação do país.

Figura 4 – Tipos de rochas

| Denominação Petrológica | Descrição |
|-------------------------|---|
| Andesito | Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina |
| Basalto | Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica |
| Conglomerado | Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural |
| Diorito | Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita ou biotita |
| Gabro | Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina |
| Gnaisse | Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa |
| Granito | Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo |
| Calcário | Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio |
| Quartzito | Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo |
| Riolito | Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica |
| Sienito | Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita ou augita |
| Traquito | Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico |

Fonte: Bernucci et al. (2006, p. 118).

- b) Agregados artificiais: provenientes de resíduos industriais, como, por exemplo, a escória de alto-forno e de aciaria. Na pavimentação asfáltica o tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado são as escórias de alto forno, resíduos provenientes da indústria do aço, muito embora, necessitem um tratamento adequado antes da sua aplicação, para não apresentar problemas como expansibilidade e heterogeneidade;
- c) Agregados reciclados: agregados oriundos da reutilização de materiais diversos. Em alguns países, o resíduo sólido proveniente da construção civil é a principal fonte de agregados para pavimentação, tendo como principal objetivo a redução de descarte deste material no meio ambiente.

2.5.2 Classificação dos Agregados Quanto ao Tamanho

A classificação prescrita pela Norma DNIT 412/2019 – ME, deve ser feita por um conjunto de peneiras quadradas subsequentes, que atendem à Norma DNER – EM 035/95, malhas com aberturas estabelecidas, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Série de peneiras

| Série normal mm | Série normal polegadas | Peneira nº |
|--------------------|---------------------------|---------------|
| 50,00 | 2 | - |
| 37,50 | 1 ½ | - |
| 25,00 | 1 | - |
| 19,00 | ¾ | - |
| 12,50 | ½ | - |
| 9,50 | 3/8 | - |
| 6,30 | ¼ | - |
| 4,75 | - | 4 |
| 2,36 | - | 8 |
| 2,00 | - | 10 |
| 1,18 | - | 16 |
| 0,60 | - | 30 |
| 0,425 | - | 40 |
| 0,30 | - | 50 |
| 0,15 | - | 100 |
| 0,075 | - | 200 |

Fonte: DNIT 412/2019 – ME.

- a) Agregado graúdo: é a fração de material passante na peneira de 75mm e retido na peneira nº 4, de 4,75mm, podem ser de pedras britadas, escórias ou seixos rolados;
- b) Agregado miúdo: material retido na peneira de nº 200, mas passante na peneira de nº 4. Possui dimensões entre 0,075mm e 4,75mm, devem ser resistentes, estando livres de torrões de argila e de substâncias nocivas;
- c) Material de enchimento ou fíler: material passante na peneira de nº 200, ou seja, menor que 0,075mm. Deve ser constituído de materiais minerais finamente divididos, estar seco e isento de grumos.

2.6 Plásticos

Define Nielsen (1974), de forma generalizada, plásticos como sendo materiais orgânicos maleáveis em que a maleabilidade plástica é uma das suas principais características. Subdividindo-os em:

- a) fluidoplásticos – autofluidos a 20° C (líquido viscoso);
- b) termoplásticos – não temperáveis, moldáveis a quente;
- c) duroplásticos – temperáveis;
- d) elastômeros – elásticos.

Para Donato (1972, p. 4) “a indústria da construção recebeu um notável reforço do plástico através de tubos de encanamento, válvulas, sifões, revestimentos e chapas para cobertura e iluminação”. Devido as ótimas propriedades e desempenho no acondicionamento, distribuição, conservação dos mais variados produtos, as embalagens plásticas rígidas têm se difundido nos últimos anos. Bebidas carbonatadas, água mineral, óleos vegetais e minerais, produtos de limpeza, higiene, produtos químicos, farmacêuticos e cosméticos são os principais empregadores de embalagens plásticas (VENCELINO, 1998).

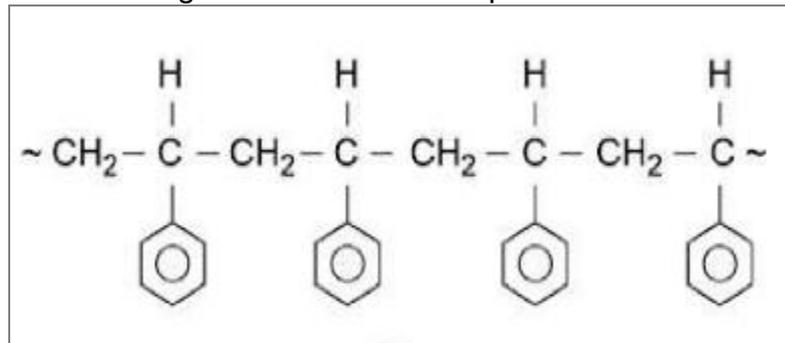
Donato (1972) denomina plástico como uma prolífera família de sintéticos formados por grandes moléculas. São produtos que, em contato com o calor ou solventes, amolecem, ficando facilmente moldáveis. Para melhor modificar suas propriedades, os plásticos podem receber aditivos, como estabilizadores, resistindo, assim, a ácidos e temperaturas mais elevadas. Também classifica plásticos como:

Quanto aos plásticos, classificam-se em duas categorias: os termoplásticos, que, sob pressão e calor, passam por uma transformação física, não sofrem mutação em sua estrutura química e se tornam reversíveis, isto é, podem ser reaproveitados em novas moldagens; e termoestáveis ou termofixos, quando sofrem uma transformação química sob o efeito de calor e pressão, tornam-se irreversíveis, não podendo ser reaproveitados. Pertencem à primeira categoria os derivados de celulose, PVC rígido e não rígido, polietileno de alta e baixa densidade, polipropileno, poliestireno, policarbonato “nylon” e outros. E pertencem à categoria dos termoestáveis os plásticos fenólicos, uréicos, o poliéster e a melamina (DONATO, 1972, p. 35).

Polímeros são macromoléculas constituídas por repetitivos monômeros e quanto maiores as macromoléculas, melhores são as propriedades físicas. Sendo os polímeros a principal base de grande parte dos materiais plásticos (DONATO, 1972).

A estrutura do poliestireno, por exemplo, pode ser escrita como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Estrutura do poliestireno



Fonte: Rudin e Choi (2015).

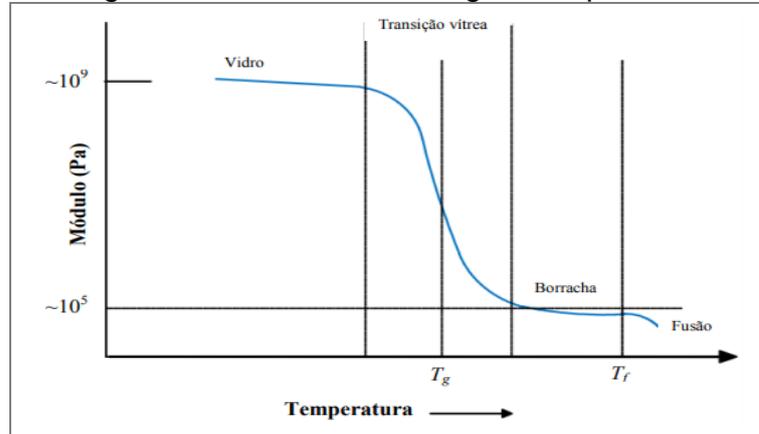
Segundo Wiebeck e Harada (2005), duas categorias dividem os plásticos de acordo com suas propriedades e também pela escala de produção, que são: termoplásticos e termorrígidos.

Para Canevarolo Júnior (2002) são, pelo menos, três temperaturas de transição importantes para os polímeros: transição vítrea, fusão cristalina e cristalização.

- a) transição vítrea (T_g): valor médio da faixa de temperatura que permite ao polímero mobilidade, ou seja, permite a mudança de conformação;
- b) temperatura de fusão cristalina (T_m): valor médio da faixa de temperatura em que o material se funde, ou seja, desaparecem as regiões cristalinas, a estrutura regular de empacotamento se dissolve, mudando do estado borrachoso para o estado viscoso;
- c) temperatura de cristalização (T_c): temperatura intermediária, entre T_m e T_g, em que o polímero em fase de resfriamento, a partir de seu estado fundido, tem um número grande de cadeias poliméricas formadas com regularidade. Isto se reflete em toda a massa polimérica, produzindo-se a cristalização da massa fundida.

Módulo de Young é uma propriedade mecânica que mede a rigidez de um material sólido, o modelo linear de polímero é representado pela Figura 6.

Figura 6 – Módulo de Young vs temperatura



Fonte: Zhang (2010 apud REIS, 2012, p. 10).

A temperatura de amolecimento (VICAT), é definida através do ensaio normatizado pela ASTM 1525, o qual penetra uma agulha de ponta plana com 1mm² de área numa taxa de avanço constante com carga e aquecimento pré-determinado (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

Para cada tipo de polímero são incorporadas diferentes matérias-primas, variando propriedades e aplicações, tais como: aditivos, corantes, cargas, plastificantes, lubrificantes, antibloqueio, estabilizantes, antioxidantes, retardantes de chama e/ou antiestético (ROMAN, 1997).

A Figura 7 identifica os principais termoplásticos e termorrígidos, de uso industrial, a serem analisados, de acordo com o tipo, aplicações e a numeração para identificá-los após a coleta seletiva.

Figura 7 – Nomenclatura seletiva dos plásticos



Fonte: Ciclo da Reciclagem (2014).

Legenda: 1: Politereftalato de butileno (PET); 2: Polietileno de alta densidade (PEAD); 3: Policloreto de vinila (PVC); 4: Polietileno de baixa densidade (PEBD); 5: Polipropileno (PP); 6: Poliestireno (PS); OUTROS: Etileno vinil acetato (EVA), acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), policarbonato (PC), poliuretano (PU), Poliamidas (PA), entre outras.

Conforme Wiebeck e Harada (2005), os polímeros citados na Figura 7 são definidos e caracterizados da seguinte forma:

- a) POLITEREFTALATO DE BUTILENO (PET) – Dentro da categoria de poliéster, termorrígido, o PET é classificado como plástico de uso geral, com boa resistência mecânica e térmica, alta dureza e coesão, produzido normalmente por injeção ou extrusão. Peças injetadas de PET são utilizadas em grande escala na indústria automobilística, embalagens de alimentos e bebidas, equipamentos eletrônicos e médicos, artigos de vestuários, entre outros. Com temperatura de amolecimento de 130°C e temperatura de fusão acima de 250°C (Figura 8).

Figura 8 – Garrafas PET



Fonte: Fragmaq (2019).

- b) POLIETILENO (PE) – Um dos polímeros termoplásticos, com variações de densidade e de imensa utilização no mundo, destaca-se por ter alta resistência a abrasão, boa absorção de ruídos e não absorção de água. Os polietilenos de alta densidade (PEAD) são um produto de processamento fácil, opaco e com boa resistência mecânica e química. Estão presentes principalmente em embalagens de produtos químicos, lubrificantes, produtos de limpeza, entre outros (Figura 9). Sua temperatura média de amolecimento é de 135°C e de fusão cerca de 293°C.

Figura 9 – Embalagens plásticas



Fonte: Brasilão (2019).

Os polietilenos de baixa densidade (PEBD) são um material de baixa condutividade elétrica e térmica, utilizados em sacolas, bombonas, tambores, lonas, mangueiras, entre outros (Figura 10). Sua temperatura de amolecimento é entre 80°C e 130°C e de fusão cerca de 140°C.

Figura 10 – Lonas plásticas

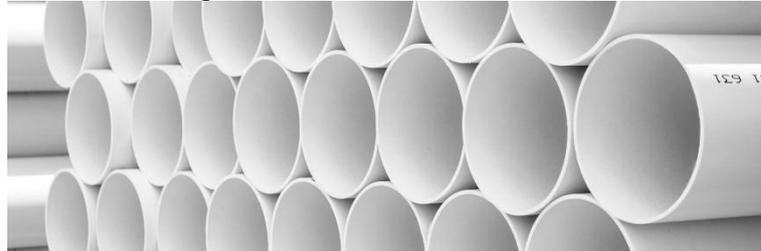


Fonte: Lonas Plásticas (2019).

- c) POLICLORETO DE VINILA (PVC) – Segundo Alves et al. (1998), derivado do petróleo e de fontes inorgânicas, o PVC é a segunda resina mais vendida no mundo, perdendo apenas para o polietileno. Presente em filmes para proteger alimentos, garrafas de óleo vegetal, de cosméticos, de produtos de limpeza e de higiene pessoal. Normalmente fabricado com aditivos, torna-se um material extremamente versátil, podendo atender

diversas áreas da indústria, principalmente da construção civil na forma de tubos (Figura 11). Possui temperatura de amolecimento na ordem de 74°C e temperatura de fusão cerca de 180°C.

Figura 11 – Tubos e conexões



Fonte: Amanco (2019).

- d) POLIPROPILENOS (PP) – Termoplástico vastamente utilizado na área automotiva, brinquedos, embalagens em geral, linha de eletrodomésticos por obter propriedades flexivas, boa resistência à tração e à impactos. Sua temperatura de fusão é de 160°C e a de amolecimento 115°C. A Figura 12 mostra exemplo do seu uso.

Figura 12 – Engradados de bebidas



Fonte: Dreamstime (2019).

- e) POLIESTIRENO (PS) – Um polímero vinílico, com temperatura de amolecimento acima de 100°C e de fusão por volta de 270°C, é um componente muito utilizado na indústria para fins que necessitam de altas temperaturas. Empregado em carcaças de secadores de cabelo, equipamentos de informática, eletrodomésticos, brinquedos em geral (Figura 13).

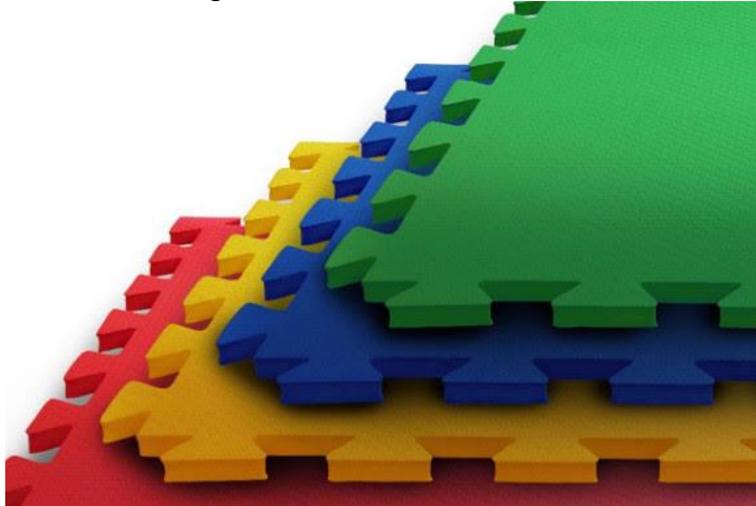
Figura 13 – Equipamentos para alta temperatura



Fonte: Innova (2019).

- f) ETILENO ACETATO DE VINILA (EVA) – Polímero emborrachado, flexível, é obtido através do copolímero de etileno-acetato de vinila, entre suas principais características está a absorção de calor, entrando em combustão se atingir temperaturas acima de 80°C, usado principalmente em solado de calçados, tapetes, brinquedos (Figura 14).

Figura 14 – Laminas de EVA



Eureka (2019).

- g) ACRILONITRILA-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS) – Classificado como termoplástico rígido, são materiais de alta resistência mecânica, fácil moldabilidade e média resistência à temperatura, sendo aplicados normalmente no âmbito automobilístico, de eletrônicos e de eletrodomésticos. Temperatura de amolecimento encontra-se acima de 80°C e temperatura de fusão por volta de 175°C (Figura 15).

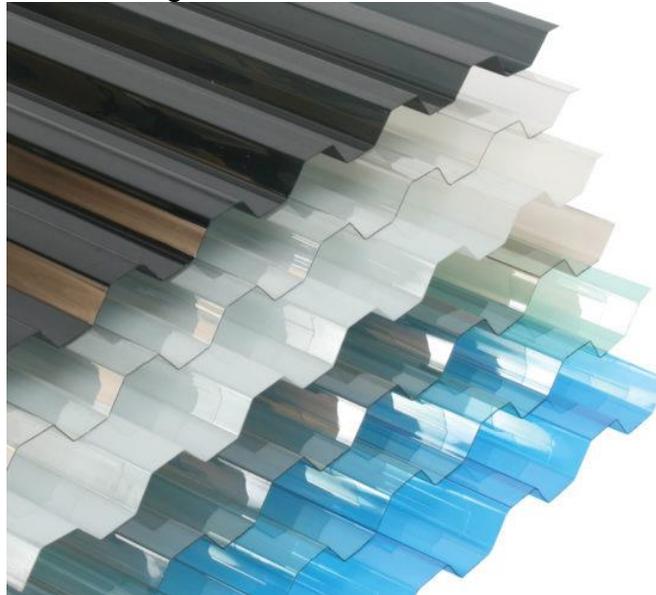
Figura 15 – Brinquedos



Fonte: Tecmundo (2019).

- h) POLICARBONATO (PC) – Um poliéster termoplástico capaz de substituir metais e vidros pelas características de resistência e transparência, encontrado em grande escala nas sinalizas de veículos, telhas coloridas e transparentes, componentes isolantes de eletricidade, capacetes e janelas de segurança, discos compactos (CD's), régua, rotores de bombas, solados de sapatos, entre outros (Figura 16). Temperatura de amolecimento entre 225° e 250°C e de fusão por volta dos 300°C.

Figura 16 – Telhas coloridas



Fonte: Vick (2019).

- i) POLIURETANO (PU) – Resina plástica de aplicação geral, podendo ser tanto termorrígido quanto termoplástico, sendo muito utilizada na produção de espumas. Também encontrada em calçados, rodas de skate, peças flexíveis, painéis isolantes, molduras de espelhos e vidros, anéis de vedação, peneiras, para-choques, revestimentos protetores contra

materiais abrasivos, entre outros (Figura 17). Temperatura máxima em longos períodos por volta de 115°C e de fusão na casa de 250°C.

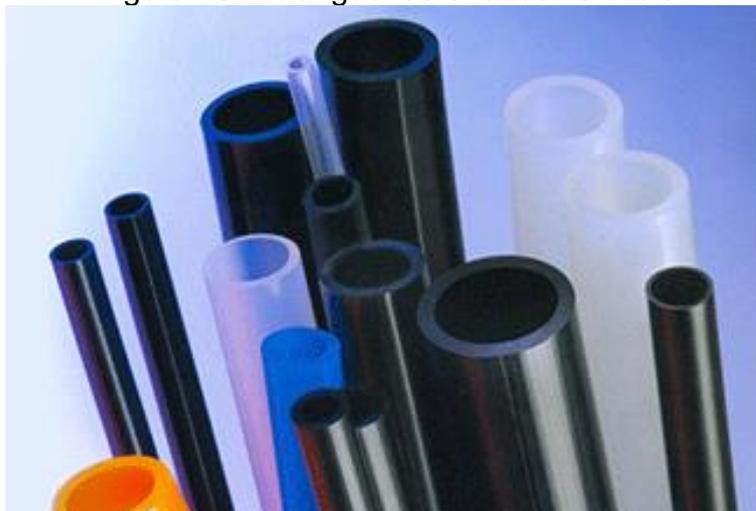
Figura 17 – Peças automotivas



Fonte: Oliveira Poliuretanos (2019).

- j) POLIAMIDA (PA) – São termoplásticas com ótimas propriedades mecânicas, resistente às intempéries, altíssima temperatura de fusão, boa resistência ao impacto e à fadiga. Muito utilizada na indústria automobilística, como maçanetas, puxadores das portas, recipientes de água do motor, óleo lubrificante, ventoinhas do radiador, entre outros. Também no âmbito de materiais elétricos, como plugues, conectores, coberturas de interruptores (Figura 18). Temperatura de amolecimento por volta de 60°C e de fusão de 220°C.

Figura 18 – Mangueiras e tubos flexíveis



Fonte: Saint-Gobain (2019).

2.7 Resíduos Plásticos no Concreto Asfáltico

Conforme Polacco et al. (2004), misturas asfálticas modificadas dependem dos tipos de polímeros utilizados e da sua concentração. São basicamente divididos em três principais categorias: elastômeros termoplásticos, polímeros e polímeros reativos. O primeiro confere melhoramento significativo nas características elásticas, já as duas últimas categorias proporcionam à mistura maior rigidez e redução nas deformações causadas pelas cargas.

Os asfaltos modificados com polímeros possuem suas características mecânicas modificadas, em temperaturas elevadas ocorre aumento de viscosidade e de forma contrária em baixas temperaturas. Também há um aumento da temperatura do ponto de amolecimento, melhora na adesividade e coesão, maior resistência ao envelhecimento e maior elasticidade, diminuindo deformações permanentes no pavimento (MOURA, 2001).

Já para Specht (2004), os asfaltos modificados com polímeros possuem custo inicial maior, maior dificuldade de transporte, armazenamento e são mais difíceis de serem incorporados à mistura.

Para aperfeiçoar propriedades de adesão e coesão do pavimento e também diminuir custos de manutenção, pode-se adicionar polímeros como o PET no composto asfáltico, que também promove o melhoramento da resistência a erosão, fissuras térmicas e avarias provocadas pela fadiga (SULYMAN; HAPONIUK; FORMELA, 2016).

Shedame e Pilate (2014), apresentaram resultados de experimentos utilizando resíduos plásticos em geral na mistura asfáltica, com o objetivo de melhorar suas propriedades. A substituição de 0,76% em peso de agregado e 3% de enchimento ocasionaram maior resistência às temperaturas elevadas e melhora significativa no desempenho do revestimento.

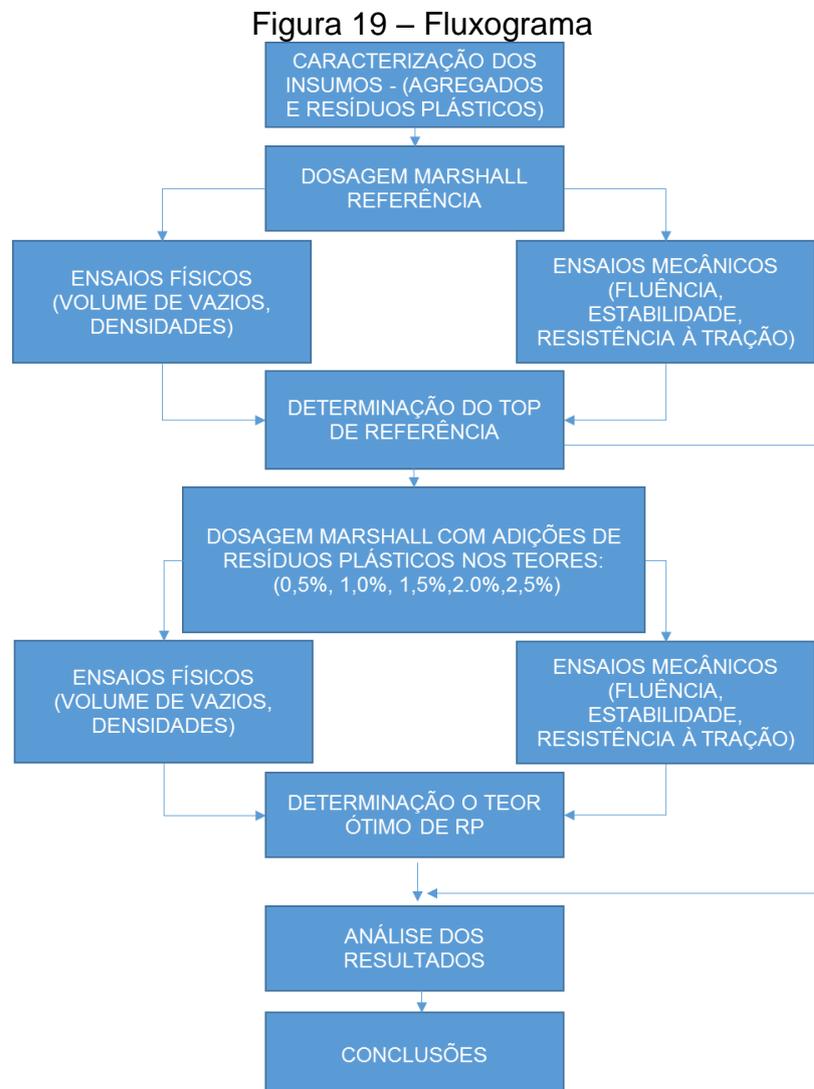
A incorporação de polímeros, segundo Moghaddam et al. (2012), pode ser feita tanto em um processo úmido como seco. Quando a inserção é feita substituindo parte do ligante, o processo é denominado úmido, por outro lado, quando o polímero é adicionado diretamente com o agregado, denomina-se processo seco.

3 METODOLOGIA

A presente metodologia contempla a elaboração de um projeto de CA e, também, uma pesquisa exploratória através de experimentos laboratoriais com o objetivo de verificar o comportamento físico e mecânico do concreto asfáltico convencional com a adição de diferentes percentuais de resíduos plásticos.

3.1 Fluxograma

Na Figura 19 é apresentado o fluxograma de atividades que foram desenvolvidas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2 Caracterização dos Insumos para Concreto Asfáltico

A seleção dos insumos foi feita para o melhor enquadramento das misturas na faixa C do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT). Utilizou-se agregados de basalto, do tipo 3/4" (brita nº 1 – 19mm), de 3/8" (brita nº 0 – 9,5mm) e pó de pedra (4,75mm) coletados na pedreira da cidade de Canela - RS. O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70 disponibilizado pelo laboratório.

Para a produção de Concreto Asfáltico (CA), foram feitos procedimentos experimentais, caracterização dos agregados (Figura 20) no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Vale dos Sinos (LMCC). Classificou-se o CA de acordo com faixas granulométricas padronizadas, buscando obter o teor "ótimo" de betume, através do método mais utilizado no Brasil, o método Marshall, possibilitando realizar diversos tipos de ensaios físicos e mecânicos.

Figura 20 – Agregados



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2.1 Granulometria dos Agregados

Realizou-se a granulometria dos agregados conforme a especificação do Norma DNIT 412/2019 - ME, utilizando as peneiras dispostas na Tabela 2, a fim de enquadramento posterior na Faixa "C" do DNIT.

Tabela 2 – Faixas granulométricas do DNIT

| Peneira de malha quadrada | | % em massa, passando | | | |
|-------------------------------|---------------|--|--|----------------------------------|-------------|
| Série ASTM | Abertura (mm) | A | B | C | Tolerâncias |
| 2" | 50,8 | 100 | - | - | - |
| 1 1/2" | 38,1 | 95 – 100 | 100 | - | ±7% |
| 1" | 25,4 | 75 – 100 | 95 – 100 | - | ±7% |
| 3/4" | 19,1 | 60 – 90 | 80 – 100 | 100 | ±7% |
| 1/2" | 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 (Blinder) | 4,5 – 7,5 Camada de ligação e rolamento | 4,5 – 9,0 Camada de rolamento | ±0,3% |

Fonte: DNIT 031/2006 – ES.

Para o ensaio, as amostras de brita 3/4" (19mm), brita 3/8" (9,5mm) e pó de pedra (4,8mm) foram quarteadas e separadas com a massa mínima de acordo com a Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Massa mínima da amostra de ensaio

| Dimensão máxima característica do agregado (mm) | Massa mínima da amostra de ensaio (kg) |
|---|--|
| Agregados miúdos: | |
| 4,8 | 1 |
| Agregados graúdos: | |
| 9,5 | 5 |
| 19,0 | 7 |
| 25,0 | 10 |
| 38,00 | 15 |
| 50,00 | 20 |

Fonte: DNER-ME-083/1998.

Inicialmente os materiais foram dispostos em bandejas metálicas e secos em estufa aquecida a 105°C, por um período de 24 horas, realizados quarteamentos sucessivos, até que a amostra fosse reduzida à quantidade desejada, então, a granulometria dos agregados foi determinada, fazendo uso de peneiras com sequência crescente (base para topo).

Após a sequência do processo de peneiramento, foi realizada a pesagem do material que ficou retido em cada peneira, segundo a Norma o somatório de todas as massas retidas não deve ficar inferior a 0,3% da massa inicial.

3.2.2 Absorção e Densidade dos Agregados

A porosidade dos agregados é determinada pelo volume de água que eles absorvem quando submersos. Quanto maior for a porosidade, maior será a absorção de água ou ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2006).

Para a determinação da absorção e densidades dos agregados graúdos, foram realizados ensaios com materiais retidos na peneira 4,8mm, conforme a especificação da Norma DNIT 413/2019 – ME.

A massa específica real, massa específica aparente e absorção dos agregados graúdos foram obtidas, respectivamente, através das equações 1, 2 e 3 a seguir:

$$G_{sa} = \frac{A}{B - C} \times 0,9971 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

G_{sa} = massa específica real dos grãos do agregado (g/cm^3);

A = massa do agregado seco em estufa (g);

B = massa do agregado saturado com a superfície seca (g);

C = massa submersa do agregado (g).

$$G_{sb} = \frac{B}{B - C} \times 0,9971 \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

G_{sb} = massa específica aparente dos grãos do agregado (g/cm^3);

B = massa do agregado saturado com a superfície seca (g);

C = massa submersa do agregado (g).

$$a = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

a = absorção (%);

A = massa do agregado seco em estufa (g);

B = massa do agregado saturado com a superfície seca (g).

A constante 0,9971 é a massa específica da água a 25°C.

Para o agregado miúdo, passante na peneira 4,78mm e retido na peneira 0,075mm, foi realizado o ensaio de absorção e densidades, conforme especificações do DNIT 411/2019 – ME.

A massa específica real, massa específica aparente e absorção dos agregados miúdos foram obtidas, respectivamente, através das equações a seguir:

$$G_{sa} = \left[\frac{A}{B + B1 - C} \right] 0,9971 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

G_{sa} = massa específica real do agregado miúdo (g/cm³);

A = massa da amostra seca em estufa, em (g);

B = massa do picnômetro mais água, em (g);

B1 = massa da amostra saturada com a superfície seca, em (g);

C = massa do picnômetro mais amostra e mais água, em (g).

$$G_{sb} = \left[\frac{B1}{B + B1 - C} \right] 0,9971 \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

G_{sb} = massa específica aparente do agregado miúdo (g/cm³);

B = massa do picnômetro mais água, em (g);

B1 = massa da amostra saturada com a superfície seca, em (g);

C = massa do picnômetro mais amostra e mais água, em (g);

$$a = \left[\frac{B1 - A}{A} \right] \times 100 \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

a = absorção (%);

A = massa da amostra seca em estufa, em (g);

B1 = massa da amostra saturada com a superfície seca, em (g).

A constante 0,9971 é a massa específica da água a 25°C.

A Tabela 4 apresenta os resultados para as densidades e absorção encontradas nos agregados em estudo. Observa-se também que os valores encontrados se aproximam dos resultados das pedreiras da região.

Tabela 4 – Massa e absorção dos agregados

| | Agregado | Graúdo | Miúdo |
|------------|---------------------------|---------------|--------------|
| Gsa | Massa Específica Real | 2,418 | 2,347 |
| Gsb | Massa Específica Aparente | 2,538 | 2,533 |
| Abs | Absorção (%) | 4,980 | 3,530 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.3 Dosagem Marshall

Método desenvolvido na década de 30 por Bruce G. Marshall, nos Estados Unidos. No Brasil, é um dos procedimentos mais utilizado nos projetos de misturas asfálticas para a determinação do teor de ligante (SPECHELT, 2004).

Esse método de dosagem das misturas considera valores admissíveis de estabilidade e de fluência empiricamente. A estabilidade é o valor da máxima carga suportada pelos corpos de prova (CPs), que dependem do tipo e das proporções de CAP e agregados. Assim como a fluência demonstra a deformação da amostra quando submetida a uma tensão constante (ROGDE, 2007).

Ressalta Moura (2001), que a dosagem Marshall apresenta algumas limitações, como a compactação dos CPs. Afirma que há pouca representatividade do método de compactação em relação ao campo e a enorme influência na determinação do teor ótimo de projeto. Por outro lado, tem baixo custo dos

equipamentos necessários para sua realização, sendo também de fácil assimilação e execução, fatores que tornam de grande aceitação e utilização no meio técnico rodoviário do Brasil.

Para a realização da dosagem foram seguidas as especificações do DNER-ME-043 (1995), moldagem e compactação dos CPs sem adição de resíduos plásticos, ou seja, dosagem para obter amostras de referência para o experimento.

Segundo Bernucci et al. (2006), o teor de ligante depende também da granulometria selecionada, conseqüentemente os autores sugerem também a utilização de uma margem para os teores (-1,0%, -0,5%, T, +0,5%, +1,0%), sendo T o teor em %.

Para encontrar o teor ótimo de projeto (TOP), seguiu-se recomendações da Norma do DNER-ME-043 (1995), sendo elaborados três CPs para cada teor de ligante asfáltico (4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5%). Logo, para esta etapa do experimento foram confeccionados quinze CPs, de 1200g cada, com o objetivo de obter maior precisão nos resultados.

Os agregados foram dispostos em formas metálicas de acordo com cada traço, colocados na estufa a 160°C durante duas horas, então, colocados num taxo metálico, conferido a massa dos agregados e adicionado CAP, aquecido em 150°C, foi, então, misturado com uma colher de pedreiro até que o composto ficasse homogêneo e os agregados completamente envoltos com o ligante (Figura 21).

Figura 21 – Dosagem dos Agregados



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A Norma DNIT 178/2018 – PRO recomenda a elaboração de misturas aquecidas entre 107°C e 177°C. A mistura deste trabalho foi realizada manualmente com temperaturas por volta dos 155°C, num taxo metálico e colocado rapidamente

no molde Marshall, pré-aquecido e, então, compactado com 75 golpes por face numa temperatura, aproximada, de 140°C (Figura 22).

Figura 22 – Mistura e Compactação do CA

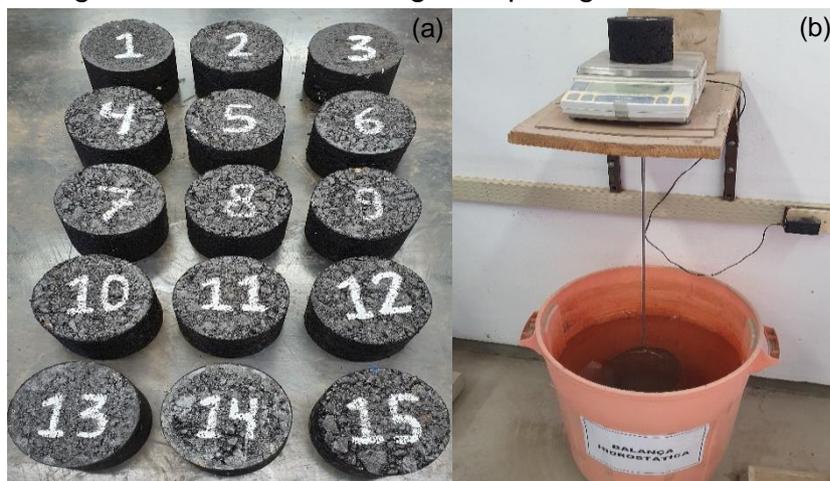


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).
 Legenda: (a) Mistura; (b) Compactação do CA.

3.4 Ensaio Físicos

Após 12 horas, houve a desmoldagem dos CPs, aferidas as dimensões, como diâmetro e altura média e também as massas de cada amostra (seca e submersa em água) (Figura 23).

Figura 23 – CP's de dosagem e pesagem hidrostática



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).
 Legenda: (a) CP's de dosagem; (b) Pesagem hidrostática

Com a grandeza das massas foi calculada a massa específica aparente (G_m), a qual determina o grau de compactação da amostra, e, por comparação com a massa específica teórica (DMT) obteve-se as relações volumétricas típicas da dosagem. Para isso foram adotadas as massas específicas aparentes médias de cada teor de ligante.

3.4.1 Densidade Máxima Teórica (DMT)

De posse das massas específicas reais dos agregados e do CAP e seus respectivos percentuais na mistura asfáltica, a densidade máxima foi calculada pela Equação 7, a seguir.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

$\%a$ = teor de asfalto em relação à massa total da mistura;

$\%Ag$ = porcentagem de agregado graúdo;

$\%Am$ = porcentagem de agregado miúdo;

$\%f$ = porcentagem de fíler;

G_a = massa específica real do asfalto (g/cm^3);

G_{Ag} = massa específica real do agregado graúdo (g/cm^3);

G_{Am} = massa específica real do agregado miúdo (g/cm^3);

G_f = massa específica real do fíler (g/cm^3).

3.4.2 Volume de Vazios

A amostra com percentual alto de vazios na mistura torna-se suscetível ao dano por umidade, pois esses vazios internos (lacunas) permitem a entrada de água, causando desagregação do material e do ar que promove o endurecimento do ligante por oxidação (HUBER, 1999).

Volume de vazios é a relação entre o volume de vazios permeáveis ao ar e o volume total da mistura. Para o cálculo se fez uso da equação 8.

$$V_v = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

V_v = Volume de vazios (%);

DMT = massa específica máxima teórica (g/cm^3);

Gmb = Massa específica aparente (g/cm^3).

3.4.3 Vazios com Betume

Vazios com betume diz respeito ao ligante disponível no CA, que é somado ao betume absorvido pelos agregados. Para o cálculo se fez uso da equação 9.

$$VCB = \frac{Gmb \times \%a}{Ga} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

VCB = Vazios com betume (%);

Gmb = Massa específica aparente (g/cm^3);

Ga = Massa específica real do constituinte (g/cm^3).

3.4.4 Vazios do Agregado Mineral

Vazios do agregado corresponde ao montante de volume de vazios e vazios com betume, ou seja, espaços preenchidos pelo ar e pelo ligante. Este parâmetro é importante, pois, caso haja consolidação imposta pela carga de serviço, o pavimento poderá se plastificar, reduzindo o volume de vazios e, conseqüentemente, deformar o CA e até mesmo ocorrer rupturas. O percentual de vazios do agregado foi encontrado através da equação 10.

$$VAM = V_v + VCB \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

VAM = Vazios do agregado mineral (%);

V_v = Volume de vazios (%);

VCB = Vazios com betume (%).

Segundo a Norma do DNIT 031/2006, há limites para os vazios do agregado, conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5 – Limites mínimos de VAM

| Tamanho Nominal Máximo do agregado | | VAM Mínimo |
|------------------------------------|------|------------|
| # | mm | % |
| 1 1/2" | 38,1 | 13 |
| 1" | 25,4 | 14 |
| 3/4" | 19,1 | 15 |
| 1/2" | 12,7 | 16 |
| 3/8" | 9,5 | 18 |

Fonte: DNIT 031/2006 – ES.

Este parâmetro é necessário, pois, se a mistura sofrer uma consolidação imposta pelo tráfego, poderá haver acréscimo na plasticidade e a redução excessiva do volume de vazios pode fazer com que as porcentagens de asfalto que preencheriam os vazios se tornem excessivas, com isso, o revestimento asfáltico pode sofrer deformações, como trilhos de roda e até mesmo rupturas.

3.4.5 Relação Betume/Vazios

Corresponde a porcentagem de VAM que é preenchido com ligante asfáltico, e pode ser definido pela equação 11.

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

RBV = Relação betume/vazios (%);

VCB = Vazios de betume (%);

VAM = Vazios do agregado mineral (%).

De acordo com a Norma do DNIT 031/2006, há limites para os parâmetros de dosagem, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros Normativos

| Características | Método de ensaio | Camada de rolamento | Camada de ligação (Binder) |
|--|-------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Porcentagem de vazios % | DNER-ME 043 | 3 a 5 | 4 a 6 |
| Relação betume/vazios | DNER-ME 043 | 75 – 82 | 65 – 72 |
| Estabilidade, mínima (Kgf) (75 golpes) | DNER-ME 043 | 500 | 500 |
| Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima, Mpa | DNER-ME 138 | 0,65 | 0,65 |

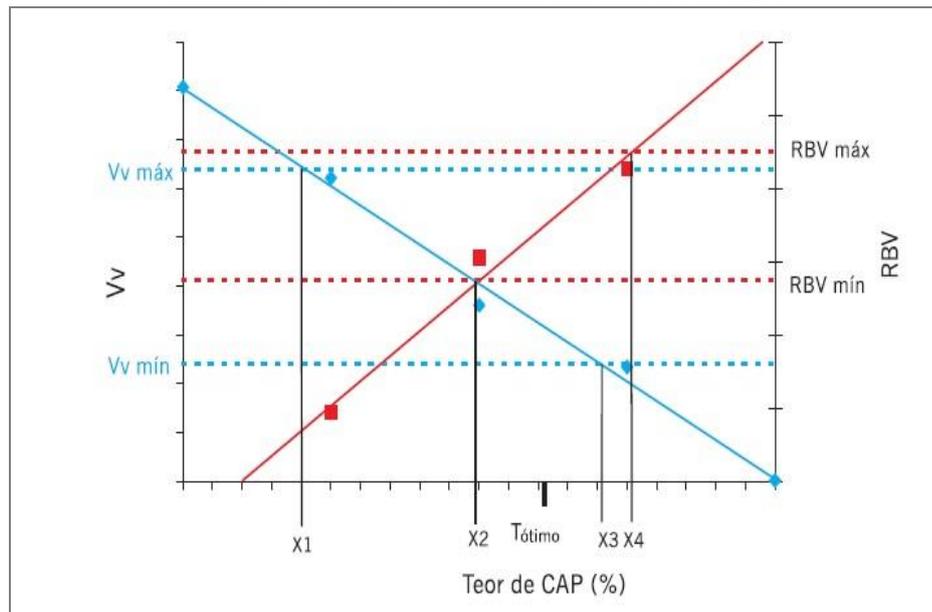
Fonte: DNIT 031/2006 – ES.

3.5 Determinação do Teor de Projeto

Segundo Bernucci et al. (2006), existem diversas formas de encontrar o teor ótimo de ligante asfáltico, através da metodologia NAPA; da estabilidade Marshall; da massa específica aparente e do Vv ou, ainda, através do uso de dois parâmetros de dosagem Vv e RBV.

Para este trabalho foi utilizado o método de análise dos parâmetros de dosagem Vv e RBV. Visando o enquadramento das misturas asfálticas dentro das especificações definidas com o intuito de evitar a degradação da mistura, por falta de ligante, ou superfícies escorregadias e deformáveis, por excesso de ligante.

Com o resultado médio de Vv e RBV, obtidos da análise dos cinco grupos de CPs, foi possível elaborar um gráfico com linhas de tendência dos parâmetros, e, com os limites respectivos de cada um, podendo determinar quatro teores de CAP (X1, X2, X3 e X4). O teor ótimo é encontrado pela média dos dois teores centrais, ou seja, teor ótimo = $(X2 + X3)/2$, como pode ser visto no Gráfico 1, a seguir.

Gráfico 1 – Teor de asfalto *versus* Vv x RBV

Fonte: Bernucci et al. (2006).

3.6 Ensaios Mecânicos

Os ensaios tiveram como objetivo medir a rigidez das amostras, podendo, assim, caracterizar o comportamento mecânico com diferentes teores de ligante.

3.6.1 Ensaio Marshall – Estabilidade e Fluência

Segundo Bernucci et al. (2006), o corpo de prova, aquecido a 60°C, disposto a uma carga de compressão crescente da prensa Marshall, sofre perda de estabilidade ou quebra de agregados quando atinge a carga máxima suportada radialmente pela amostra, neste momento se tem a Estabilidade Marshall, e a fluência é determinada pelo deslocamento vertical da base, ou seja, mede a deformação do CP.

O fator de compensação de altura do corpo de prova, através da Equação 12, corrigirá matematicamente a Estabilidade Marshall que será multiplicada pela carga, em N (kgf), obtida pela compressão da prensa.

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

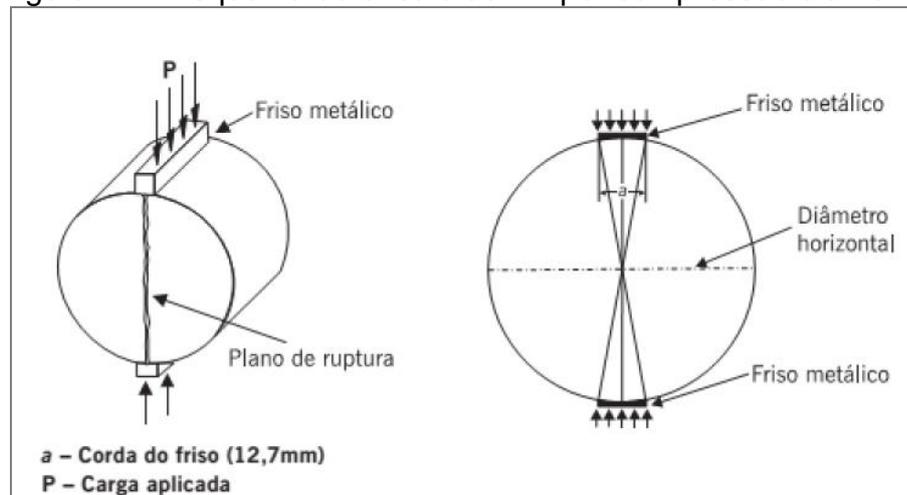
Onde:

h = espessura do CP (mm).

3.6.2 Resistência à Tração

O ensaio de tração indireta no corpo de prova, também ocorrerá com o auxílio da prensa Marshall, que consiste na aplicação de carga progressiva, através de frisos metálicos, ao longo do diâmetro do corpo de prova. As tensões de tração geradas perpendiculares ao diâmetro são duas forças de compressão concentradas diametralmente opostas. Assim como mostra a Figura 24 a seguir.

Figura 24 – Esquema do ensaio de RT por compressão diametral



Fonte: DNIT 031/2006 – ES.

Após a obtenção da força de ruptura, se aplicará a equação 13.

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde:

σ_R – resistência à tração (MPa);

F – carga de ruptura (N);

D – diâmetro de corpo-de-prova (cm);

H – altura do corpo-de-prova (cm).

3.7 Caracterização dos Resíduos Plásticos

Para o experimento de adição, foram aproveitados resíduos plásticos descartados em detritos, os quais foram limpos, com os rótulos destacados e triturados separadamente no moinho de facas no LMCC. Depois foram misturados,

Logo, os resíduos utilizados nas misturas foram os plásticos rígidos, tais como: PET, PEAD, PVC, PS, PE e também plásticos rígidos sem a identificação gravada.

A densidade desse produto, foi calculada de acordo com média ponderada das densidades de cada plástico utilizado, resultando na massa específica real de 1,225 g/cm³ (Figura 26).

Figura 26 – Densidade específica dos polímeros

| Tipo de Plástico | Densidade (g/cm ³) |
|------------------|--------------------------------|
| PP | 0.85 – 0.92 |
| PEBD | 0.89 – 0.93 |
| PEAD | 0.94 – 0.98 |
| Linha de água | |
| PS | 1.04 – 1.08 |
| PVC | 1.38 – 1.41 |
| PET | 1.8 – 2.3 |

Fonte: Identificação de Plásticos (2008).

3.8 Dosagem Marshall com Adições de Resíduos

Após a obtenção do teor ótimo do ligante betuminoso, foi realizada a dosagem Marshall, novamente, utilizando o TOP e variando apenas os teores de resíduos plásticos, objetivando encontrar o teor ótimo de resíduo. As misturas asfálticas foram aditivadas com resíduos, via processo seco, nas proporções de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% e 2,5% em relação ao peso dos agregados. Os trabalhos de Arao (2016), Queiroz (2016) e Silva (2017) foram referências para determinar os percentuais de plástico a serem utilizados nas misturas asfálticas elaboradas.

Com os agregados secos e aquecidos, foi adicionado o ligante betuminoso, misturado e, então, foram inseridos os percentuais de resíduos plásticos, fazendo imediatamente nova homogeneização e compactação.

A obtenção dos parâmetros e a realização dos demais ensaios foram executados exatamente como na dosagem de referência, ordem e método.

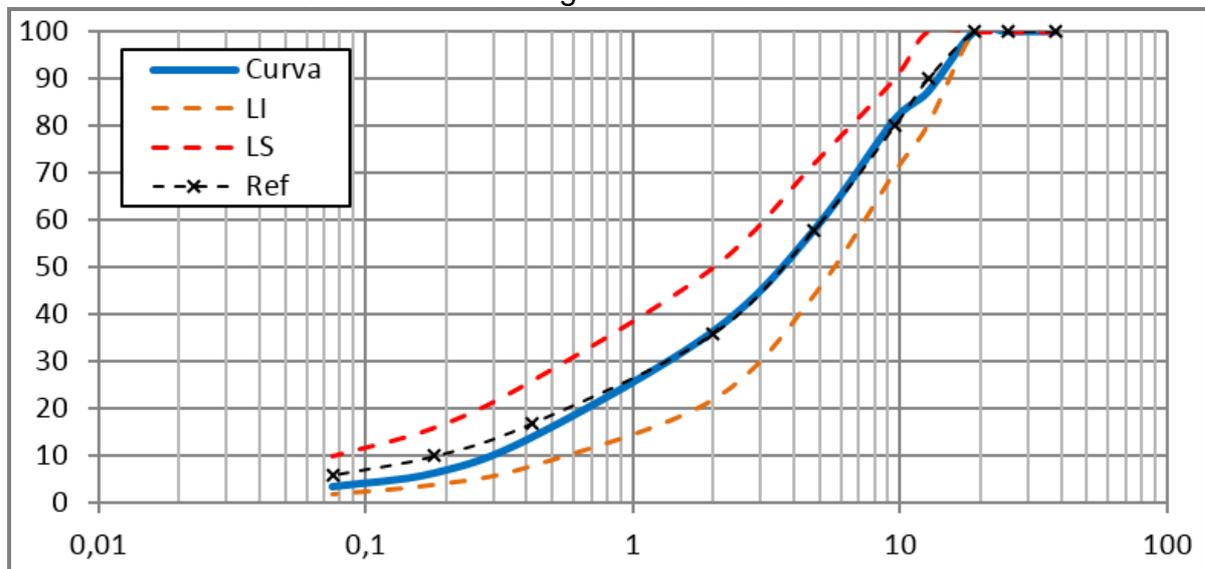
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados do programa experimental realizado, comparando com parâmetros normativos. As informações descritas são provenientes da análise dos dados coletados da caracterização dos agregados, da dosagem Marshall realizada, da análise do comportamento mecânico e físico, tanto do concreto asfáltico de referência quanto o CA realizado com a adição de diferentes tipos de resíduos plásticos.

4.1 Análise Granulométrica

Realizado o peneiramento e a pesagem, obteve-se a composição granulométrica dos agregados que foram utilizados, assim como também pôde ser traçada a curva granulométrica do composto obtido pela mistura dos três tipos de agregados propostos, exibidos no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Curva granulométrica da mistura



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Calculou-se o percentual adequado de cada material visando uma mistura resultante que se enquadrasse na faixa desejada (Faixa C – DNIT), obteve-se um percentual de 21,0% de brita 3/4", 24,0% de brita 3/8" e 55% de pó de pedra. O gráfico 2 expressa a delimitação da faixa com os limites, inferior e superior, a linha de referência e também a curva desempenhada pela mistura dos agregados. A

mistura ficou um pouco abaixo nas peneiras menores, entretanto, os agregados satisfizeram a composição da Faixa “C” do DNIT.

4.2 Dosagem Marshall de Referência

De posse dos percentuais dos agregados, enquadrados na faixa de projeto, fez-se, então, o incremento de crescentes percentuais de CAP, percentuais de cada insumo utilizado são exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Dosagem Convencional

| Teores CAP (%) | | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 |
|-----------------------|------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Brita 1 | 21,0 | 20,1 | 20,0 | 19,8 | 19,7 | 19,6 |
| Brita 0 | 24,0 | 22,9 | 22,8 | 22,7 | 22,6 | 22,4 |
| Pó | 55,0 | 52,5 | 52,3 | 52,0 | 51,7 | 51,4 |
| | 100 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.3 Parâmetros Físicos e Mecânicos dos CP's de Referência

A tabela 8 representa resumidamente os resultados obtidos através da média dos 3 CP's para cada teor de CAP.

Tabela 8 – Dosagem Marshall Convencional

| Teor de CAP | 4,5% | 5% | 5,5% | 6% | 6,5% |
|------------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Gmb (g/cm ³) | 2,121 | 2,124 | 2,120 | 2,132 | 2,152 |
| DMT (g/cm ³) | 2,242 | 2,228 | 2,214 | 2,200 | 2,186 |
| Volume de Vazios (%) | 5,40 | 4,67 | 4,25 | 3,09 | 1,57 |
| Vazios com Betume (VCB) (%) | 9,43 | 10,49 | 11,52 | 12,64 | 13,82 |
| Vazios Ag. Mineral (VAM) (%) | 14,84 | 15,17 | 15,77 | 15,73 | 15,39 |
| RBV (%) | 64 | 69 | 73 | 80 | 90 |
| Estabilidade (Kgf) | 1003 | 878 | 1057 | 1264 | 1168 |
| Fluência (mm) | 2,3 | 2,5 | 3,3 | 3,6 | 4,2 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

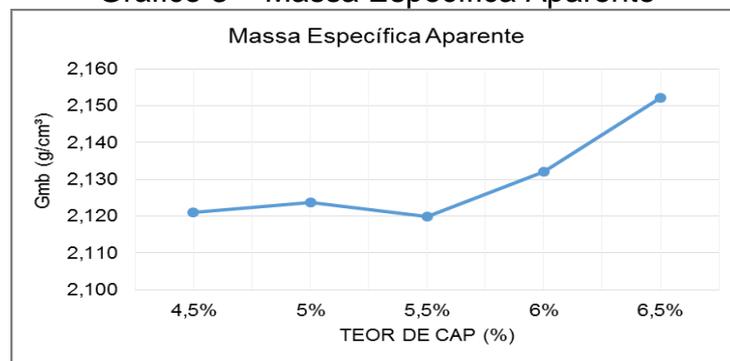
Observa-se que os gráficos apresentados a seguir (Gráficos 3 a 8), de uma forma geral e seguindo a literatura, apresentaram comportamentos esperados para cada parâmetro Marshall.

O volume de vazios foi diminuindo conforme o teor de ligante aumentava, devido a formação de masticue de enchimento dos vazios.

O RBV, através de uma linha crescente, confirmou que com o acréscimo de ligante os vazios minerais se preenchem, aumentando os valores do vazio cheios de betume.

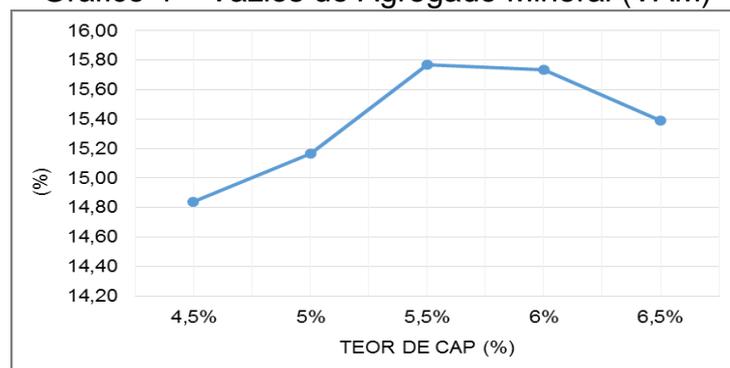
Para a estabilidade e a fluência os CP's atenderam satisfatoriamente seus parâmetros normatizados.

Gráfico 3 – Massa Específica Aparente



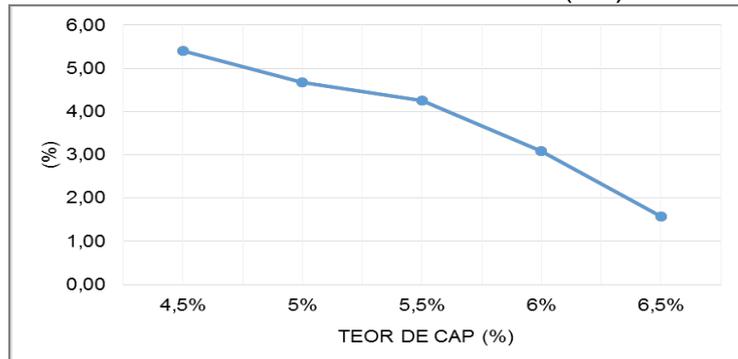
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 4 – Vazios do Agregado Mineral (VAM)



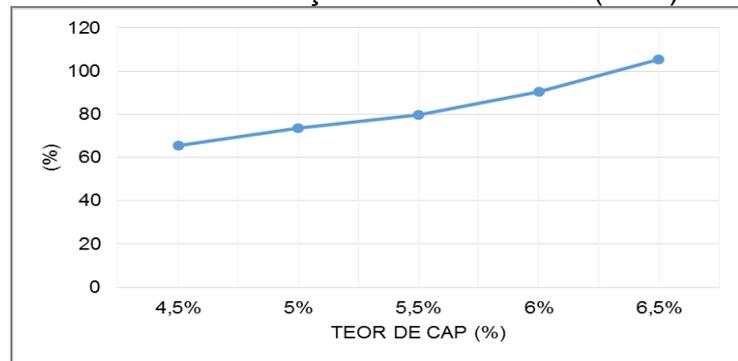
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 5 – Volume de Vazios (VV)



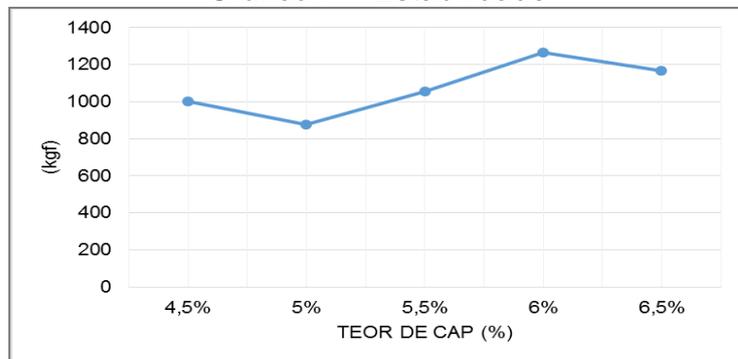
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 6 – Relação Betume/Vazios (RBV)



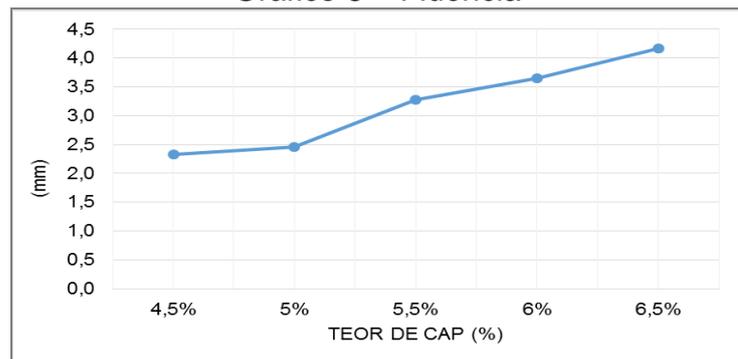
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 7 – Estabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

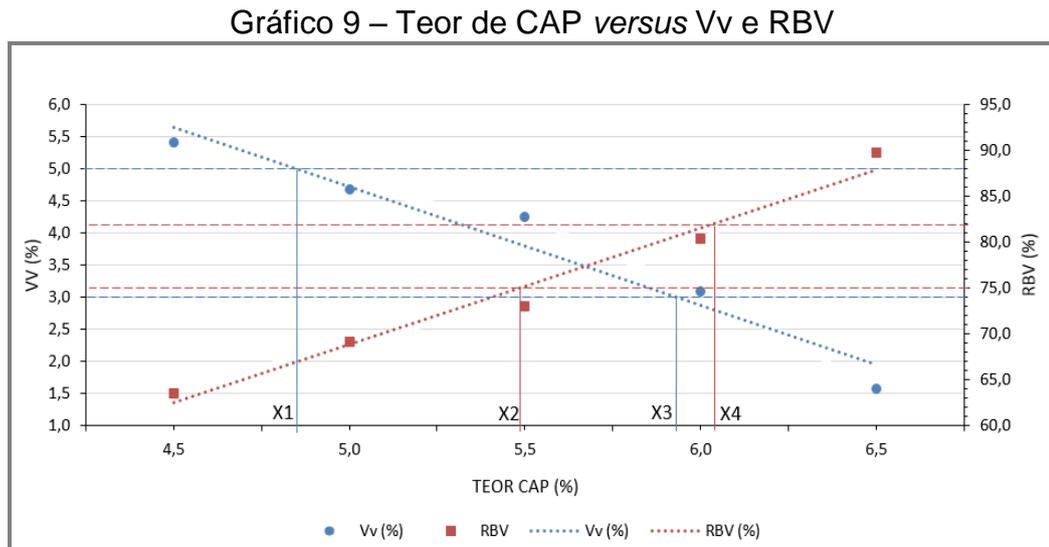
Gráfico 8 – Fluência



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.4 Determinação do Teor Ótimo de Projeto de Referência

Para a determinação do Teor Ótimo de Projeto (TOP) foi elaborado um gráfico para análise Vv x RBV. Esta metodologia tem sido adotada pelos órgãos por condicionar um melhor atendimento e simultâneo para os parâmetros de Vv e RBV da mistura. O Gráfico 9 apresenta a obtenção do TOP para a mistura de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para essa análise se desconsidera os valores extremos de X1 e X4, considerando apenas os intermediários e fazendo a média entre eles. Sendo assim, X2 é 5,45% e X3 é 5,90%, logo, o TOP obteve-se no percentual de 5,68%. Com o arredondamento adotou-se 5,7% de CAP.

Segundo Benucci et al. (2006), o teor ótimo de ligante na mistura da faixa C normalmente é de 4,5% a 9% para a camada de rolamento. Portanto, pode-se considerar o teor ótimo encontrado coerente.

4.5 Dosagem Marshall com Adição de Resíduo Plástico

A partir do CA de referência obtido, fez-se novamente todo o processo de dosagem com o objetivo de encontrar o teor ótimo de resíduo plástico (RP). Os percentuais de cada insumo utilizados nas misturas são descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Dosagem de RP

| Teores CAP (%) | | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,7 | 5,7 |
|------------------------------------|------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Teores Resíduo Plástico (%) | | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| Brita 1 | 21,0 | 19,7 | 19,6 | 19,5 | 19,4 | 19,3 |
| Brita 0 | 24,0 | 22,5 | 22,4 | 22,3 | 22,2 | 22,0 |
| Pó | 55,0 | 51,6 | 51,3 | 51,0 | 50,8 | 50,5 |
| | 100 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.6 Parâmetros Físicos e Mecânicos dos CP's com adição de RP

A Tabela 10 representa resumidamente os resultados obtidos através da média dos 3 CP's de cada teor de RP.

Tabela 10 – Dosagem Marshall de RP

| Teor de CAP | 5,7% | 5,7% | 5,7% | 5,7% | 5,7% |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Teor de RP | 0,5% | 1% | 1,5% | 2% | 2,5% |
| Gmb (g/cm ³) | 2,176 | 2,146 | 2,102 | 2,100 | 2,083 |
| DMT (g/cm ³) | 2,199 | 2,189 | 2,180 | 2,170 | 2,161 |
| Volume de Vazios (%) | 1,0 | 2,0 | 3,6 | 3,3 | 3,6 |
| Vazios com Betume (VCB) (%) | 12,3 | 12,1 | 11,8 | 11,8 | 11,7 |
| Vazios Ag. Mineral (VAM) (%) | 13,3 | 14,0 | 15,4 | 15,1 | 15,3 |
| RBV (%) | 92 | 86 | 77 | 78 | 76 |
| Estabilidade (Kgf) | 1414 | 1398 | 1334 | 1308 | 1331 |
| Fluência (mm) | 4,4 | 3,8 | 3,8 | 3,2 | 2,1 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Observa-se que os gráficos apresentados a seguir (Gráficos 10 a 15), apresentaram comportamentos diferentes dos comumente obtidos para misturas asfálticas convencionais. Com a exceção do Vv e VAM, os demais apresentaram as linhas resultantes na ordem inversa, ou seja, conforme se incrementou RP os parâmetros foram reduzindo em relação aos valores iniciais.

A densidade aparente reduziu enquanto que o volume de vazios aumentou, conforme acréscimo de RP. Estes parâmetros podem ter sido alterados pela inserção do RP pelo processo via seco, ou seja, a substituição do agregado pelo RP

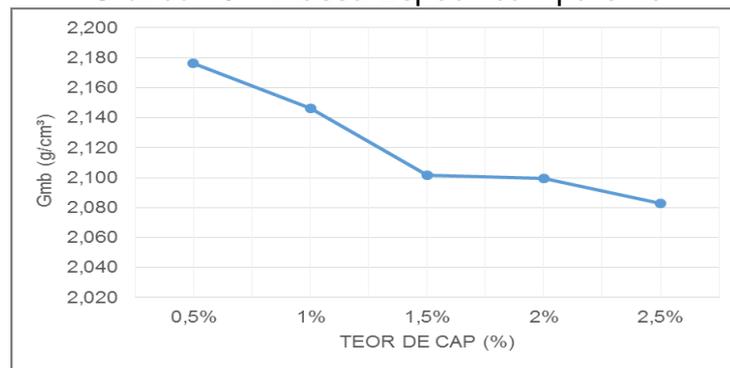
condicionou ao aumento de vazios pelo fato de não haver incorporação do RP no ligante.

A ideia de que o RP tenha se comportado como agregado artificial, porém sem a absorção de um agregado mineral se justifica ao analisar o RBV que foi reduzindo conforme o incremento de RP. Ou seja, não incrementava o valor de VCB e, com isso, o RBV reduziu.

A estabilidade apresentou uma variação, tendo uma pequena redução com o incremento de RP. Esta redução pode estar associada aos plásticos constituintes do RP adicionado, pois suas estruturas são termoplásticas e termoplásticas rígidas.

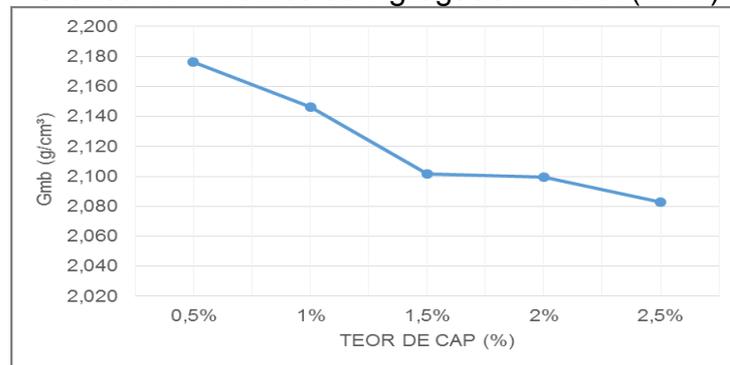
A fluência reduziu com o incremento de RP e era esperado este comportamento devido a inserção de plásticos na mistura asfáltica, gerando uma estrutura menos flexível.

Gráfico 10 – Massa Específica Aparente



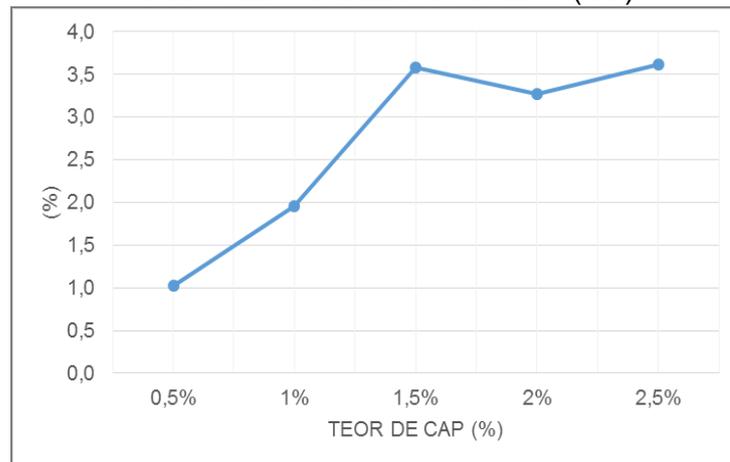
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 11 – Vazios do Agregado Mineral (VAM)



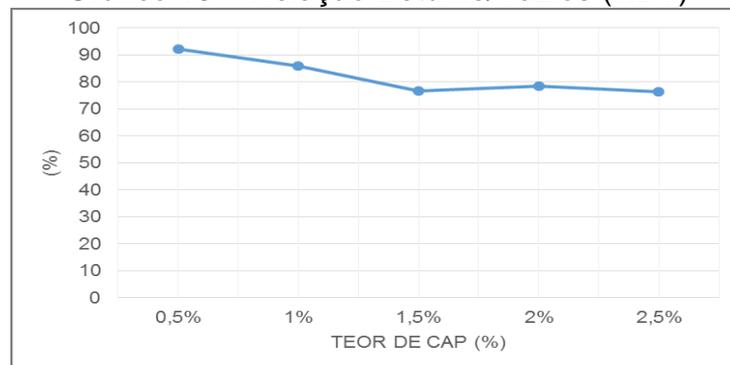
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 12 – Volume de Vazios (VV)



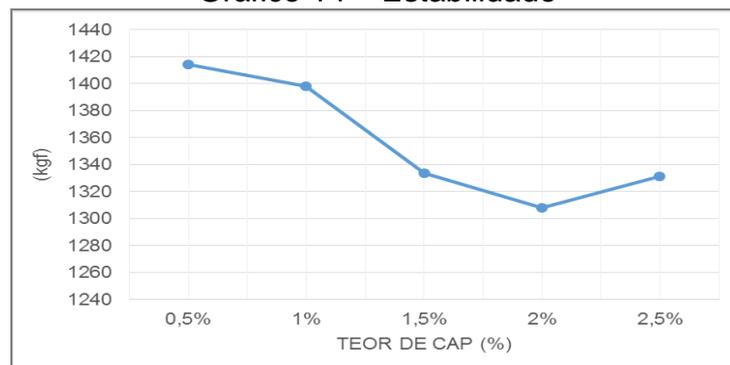
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 13 – Relação Betume/Vazios (RBV)



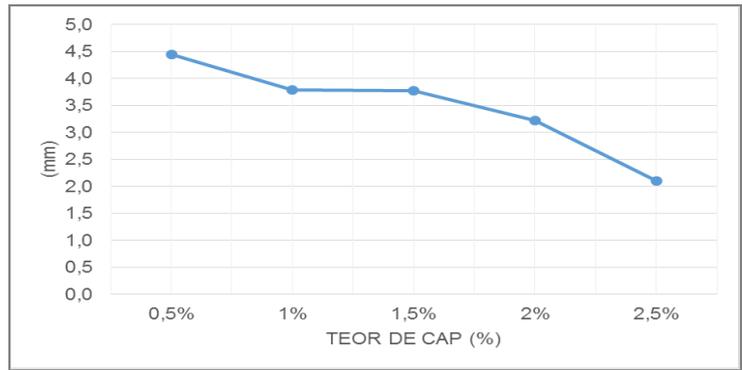
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 14 – Estabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 15 – Fluência

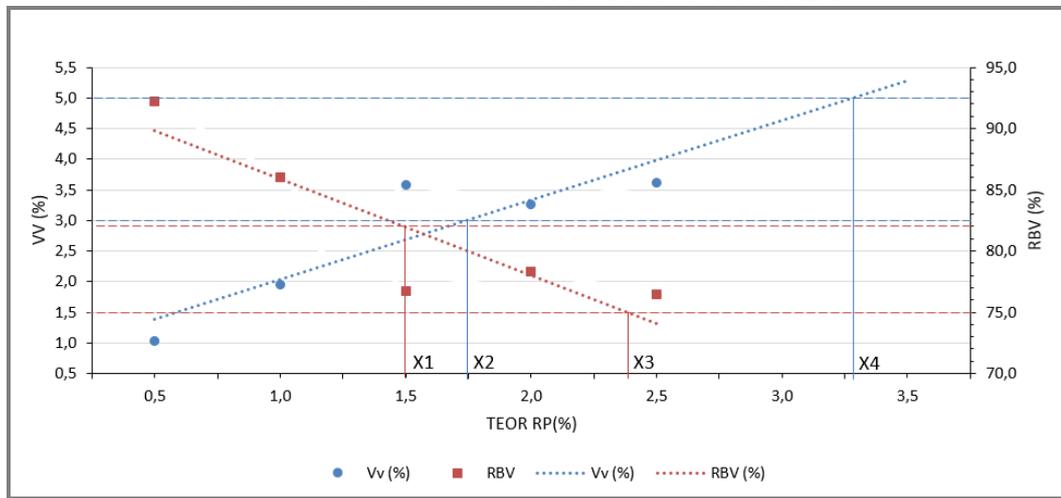


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.7 Determinação do Teor Ótimo de Resíduo Plástico

Após a análise dos resultados, fez-se um gráfico com os valores de Vv e RBV, com os limites inferiores e superiores de acordo com o DNER-ME 043 e também as linhas de tendência dos parâmetros. Também foi feita, no gráfico, a marcação dos cruzamentos entre os limites e as linhas de tendência (Gráfico 16).

Gráfico 16 – Teor de CAP versus Vv e RBV



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para essa análise desconsideraram-se os valores extremos de X1 e X4, levando em conta apenas os intermediários e fazendo a média entre eles. Sendo assim, X2 é 1,75% e X3 é 2,40%, logo, o teor ótimo de resíduo plástico obteve-se no percentual de 2,08%. Com o arredondamento adotou-se 2,1% de RP.

A formatação do gráfico inverteu, se comparado ao convencional, porém ainda assim foi possível se obter o TOP de adição de RP. Esta constatação de

inversão de linhas no gráfico pode nos indicar que a metodologia Vv x RBV não seja a mais adequada para a determinação do TOP quando for adições, via seca, de RP.

4.8 Resultados Finais

Para a análise comparativa e também para obter valores de resistência à tração (RT), foram elaborados 12 CP's, sendo 6 de referência e 6 com adição de RP. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos com os CP's de TOP convencional e TOP com adição de RP.

Tabela 11 – Comparativo dos Resultados

| Parâmetros | Norma | Camada de Rolamento | Referência | RP |
|---------------------------------------|--------------------|---------------------|------------|------|
| Volume de Vazios (%) | DNIT 031/2006 - ES | 3 a 5 | 3,2 | 3,4 |
| RBV (%) | DNIT 031/2006 - ES | 75 a 82 | 78,9 | 77,6 |
| Fluência (mm) | DNER-ES 385/99 | 2 a 4,5 | 2,3 | 3,0 |
| Estabilidade Mínima (kgf) - 75 golpes | DNIT 031/2006 - ES | 500 | 1244 | 1356 |
| Resistência à Tração Mínima (MPa) | DNIT 031/2006 - ES | 0,65 | 1,1 | 0,9 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Pode-se perceber que, de forma global, todos os parâmetros normativos foram atendidos. O volume de vazios com RP aumentou e RBV diminuiu em relação ao de referência.

O plástico também, teoricamente, aumentou a capacidade de deslocamento reversível da mistura, a fluência ficou dentro dos limites normativos, ou seja, manteve a deformabilidade, o que indica um bom comportamento para durabilidade da mistura. A fluência também pôde ter sido influenciada pela mistura dos agregados e/ou pela temperatura de mistura, muito embora tenha-se ficado dentro do recomendado, a mistura foi realizada sobre uma placa aquecida, o que causou grande dificuldade de obter um padrão exato de temperatura de mistura e compactação.

O RBV e VAM ficaram dentro dos limites estabelecidos, o que condiciona ao entendimento que não há nem excesso e nem falta de ligante na mistura, já que o VAM é o vazio que deve ser preenchido por CAP e o RBV é a relação do VCB com o VAM.

A estabilidade foi atendida pelas duas amostras com vasta folga em relação a norma e a amostra com RP apresentou superioridade também em relação à amostra de referência.

Com a aplicação do RP a resistência à tração baixou 0,2 MPa, o que, de certa forma, era esperado, pois retirou-se estrutura ao substituir agregado por RP, mas mesmo assim, a resistência ficou bem acima do mínimo, o que indica que haveria bom despenho quando submetido aos carregamentos de tráfego.

A mistura produzida com 2,1% de RP representa 37% em relação ao peso de CAP utilizado no de referência. Ceratti, Bernucci e Soares (2015) citam que geralmente é adicionado, por via úmida, de 3% a 8% de polímero na relação massa do CAP, ou seja, os resultados mostram que adicionar RP por via seca, não apenas satisfaz os parâmetros, mas, também, ao apelo de destinação adequada e sustentável dos resíduos plásticos.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo produzir uma mistura de concreto asfáltico convencional e também analisar e comparar o comportamento físico e mecânico de misturas realizadas com a adição de resíduos plásticos (RP).

5.1 Considerações finais

Concluiu-se que é de grande importância a correta dosagem de ligante asfáltico, pois, segundo Bernucci (2006), o excesso ou a falta de CAP poderá ocasionar problemas futuros relevantes no pavimento, tanto no desempenho como na forma e na sua vida útil. O excesso de ligante pode acarretar deformações plásticas do pavimento, por outro lado, a falta dele acarreta em um revestimento permeável, pouco durável, sujeito a fissurações e acentuado desgaste superficial.

O teor de ligante betuminoso e do percentual de resíduo plástico foram determinados pela dosagem Marshall, como mistura ideal obteve-se 5,7% de CAP e 2,1% de RP.

O RP incorporado fez com que as amostras apresentassem, em relação ao CA de referência, maior volume de vazios, menor RBV, maior estabilidade e fluência e menor resistência a tração. Todos esses parâmetros atenderam por completo as Normas do DNIT, resultando em um produto de qualidade, que pode ser aplicado em escala industrial, principalmente em pavimentos de condomínios, loteamentos e vias urbanas.

O teor de RP encontrado é coerente se comparado com os resultados relatados por outros autores, como Arão (2016), Queiroz (2016) e Silva (2017), que utilizaram PET, inserido via seco, em seus experimentos e encontraram valores entre 0,76 e 2,5% de plástico.

Conclui-se, ainda, que este estudo visou a reutilização de resíduos plásticos de forma sustentável, criando uma alternativa de minimizar impactos ambientais causados pelo descarte deste tipo de resíduo. Comprovou-se, a partir dos resultados satisfatórios de desempenho físico e mecânico, que o RP pode ampliar as questões de aspecto ambiental e socioeconômico, possibilitando-se elaborar projetos de misturas asfálticas dando um destino nobre aos resíduos plásticos.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram encontrados alguns assuntos que podem ser futuramente estudados, visando um melhor entendimento do tema e incentivar a reutilização dos resíduos plásticos. Para trabalhos futuros sugere-se:

- a) a realização do módulo de resiliência, deformação permanente e vida de fadiga;
- b) a aplicação da metodologia Superpave para a dosagem e compactação dos corpos de prova;
- c) realizar trechos experimentais, a fim de retificar a eficiência do pavimento com a inserção de RP;
- d) realizar misturas asfálticas com resíduos plásticos separados e analisar a influência de cada tipo;
- e) realizar estudo com o incremento de elastômeros e analisar o desempenho.

REFERÊNCIAS

ALVES, Rosa Maria Vercelino et al. **Ensaio para avaliação de embalagens plásticas rígidas**. Campinas: Cetea, 1998.

AMANCO, 2019. Disponível em: <<http://amanco.com.br/produtos>>. Acesso em: 30 maio 2019.

ARAO, Mieka. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de Polietileno Tereftalato (PET) triturado**. 2016. 114p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2006.

BRASILÃO. **Embalagens plásticas**, 2019. Disponível em: <<https://www.brasilao.com/novo-sopro-industria-e-comercio-de-embalagens-plasticas/>>. Acesso em: 30 maio 2019.

CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artileber, 2002.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; BERNUCCI, Liedi Bariani; SOARES, Jorge Barbosa. **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015.

CICLO DA RECICLAGEM, 2014. Disponível em: <<https://aterrasustentavel.wordpress.com/category/perguntas-respostas/>>. Acesso em: 20 out. 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Rodovias 2018: relatório gerencial. Brasília, 2018.

DIAGNÓSTICO ANUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Ministério do Desenvolvimento Regional, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2019. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – ES 385/99. Norma Rodoviária, 1999. p. 1-15. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dner-es385-99.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2019.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. EM 035/95. Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1995.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 043: misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1995.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 081: agregados: determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 084: agregados miúdos: determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 089: agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. ME 083: agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 031/2004 – **ES: pavimentações**: concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2004.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 095/2006 – EM. **Cimentos asfálticos de petróleo**: especificação de material, 2006.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 412/2019 – ME. **Pavimentação, misturas asfálticas**: análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – método de ensaio, 2019.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 413/2019 – ME. **Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio**, 2019.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 411/2019 – ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de Ensaio**, 2019.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. NORMA DNIT 178/2018 – PRO - Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento, 2018.

DONATO, Mário. **O mundo do plástico**: o plástico na história, o plástico no mundo, o plástico no Brasil. São Paulo: Goyana, 1972.

DREAMSTIME, 2019. Disponível em: <<https://pt.dreamstime.com/foto-de-stock-editorial-caixas-da-cerveja-em-um-dep%C3%B3sito-nas-cara%C3%ADbas-image62890663>>. Acesso em: 30 maio 2019.

EUREKA, 2019. Disponível em: <<https://www.eurekaeva.com.br/produtos>>. Acesso em: 20 out. 2019.

FÉLIX, Gildson Bastos. **Estudo da incorporação de resíduo polimérico no asfalto – propriedades físicas**. 2009. 73p. Monografia de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2009.

FRAGMAQ. **Reciclagem de garrafas pet**, 2019. Disponível em: <<https://www.fragmaq.com.br/blog/reciclagem-de-garrafas-pet/>>. Acesso em: 30 maio 2019.

HUBER, G. A. **Methods to achieve rut-resistant durable pavements**. National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 274, 1999.

IDENTIFICAÇÃO DE PLÁSTICOS, 2008. Disponível em: <<http://www.plastval.pt/index.asp?info=reciclagem/identificacao>>. Acesso em: 17 out. 2019.

INNOVA. Poliestireno alto impacto (HIPS), 2019. Disponível em: <<http://www.innova.com.br/produtos/poliestireno-alto-impacto-hips->>. Acesso em: 30 maio 2019.

KENNEDY, John Fitzgerald. **Containing the Public Messages, Speeches, and Statements of the President, de United States President (1961-1963: Kennedy)**. United States Office of the Federal Register. Publicado por U.S. Govt. Print. Off., 1962.

LISBÃO, Abigail Salles. **S588e**: estrutura e propriedade dos polímeros. São Carlos: EdUFSCar, 2012.

LONAS PLÁSTICAS, 2019. Disponível em: <<https://www.negreira.com.br/categorias/lonas-plasticas/>>. Acesso em: 20 out. 2019.

MENDES, Celso Bráulio Alves; NUNES, Fabio Rinaldi. **Asfalto Borracha**: minimizando os impactos ambientais gerados pelo descarte de pneus inservíveis no meio ambiente. 2009. 60f. Graduação em Engenharia de Produção Civil, Faculdade Brasileira UNIVIX, Vitória, 2009.

MOGHADDAM, Taher Baghaee et al. **Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles**. 2012, 7p. Center for Transportation Research, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia. 2012.

MOURA, Edson de. **Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como agentes melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas**. 2001. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transporte, São Paulo, 2001.

NIELSEN, Lawrence E. **Mechanical properties of polymers and composites**. Nova York: Marcel Dekker, 1974.

OLIVEIRA POLIURETANOS, 2019. Disponível em: <<http://www.poliuretanosoliveira.com.br/portfolio/pecas-tecnicas-em-poliuretano/>>. Acesso em: 30 maio 2019.

PINTEREST. **Antigo liquidificador**. Disponível em: <<https://br.pinterest.com/pin/688980442963414073/>>. Acesso em: 30 maio 2019.

POLACCO, Giovanni et al. **Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers**. 2004, 8p. Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Pisa, Via Diotisalvi 2, Pisa, Italy, 2004.

QUEIROZ, Bismak Oliveira. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com Politerftalato de Etileno (PET)**. 2016. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2016.

REIS, Ana Cristina Malheiro dos. **Efeito da temperatura de cura na temperatura de transição vítrea de um adesivo estrutural**. 2012, 58p. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63347/1/000151156.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

RODOCON. **Construção de rodovia**, 2019. Disponível em:<<http://gruporodocon.com.br/construcao-de-rodovia/>>. Acesso em: 30 maio 2019.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimento**. 2007. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

ROMAN, Ademar. **Polietileno PEBD processos de transformação**. 2. ed. São Paulo: Érica, 1997.

RUDIN, Alfred; CHOI, Philip. **Ciência e engenharia de polímeros**, 2015. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=QiheBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=polimero&ots=bMz2C4hKAL&sig=OGX7h9N4YZ-qU7-pr9ljTIKDP28#v=onepage&q=polimero&f=true>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

SAINT-GOBAIN, 2019. Disponível em: <<https://sgplasticos.com.br/produtos/tubos-especiais/tubo-poliamida>>. Acesso em: 30 maio 2019.

SHEDAME, Pankaj P.; PILATE, Nikhil H. **Experimental study of bituminous concrete containg plastic waste material**. 2014. 9p. Departamento of Civil Engineering G. H. Rasoni College of Engeneering. Nagput, Índia, 2014.

SILVA, Loislene da. **Análise do comportamento mecânico do concreto betuminoso usinado a quente com adição de Resíduos de Polietileno Tereftalato (PET)**. 2017. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Pró-Reitoria de Ensino, Pesquisa e Pós-Graduação. Campus de Erechim. Departamento de Engenharias e Ciência da Computação Engenharia Civil, Erechim, 2017.

SPECHT, Luciano Pivotto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SULYMAN, Mohamed; HAPONIUK, Józef; FORMELA, Krzysztof. Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET). **International Journal of Environmental Science and Development**, Engineering Materials: A Review, v. 7, n. 2, p. 100-8, 2016.

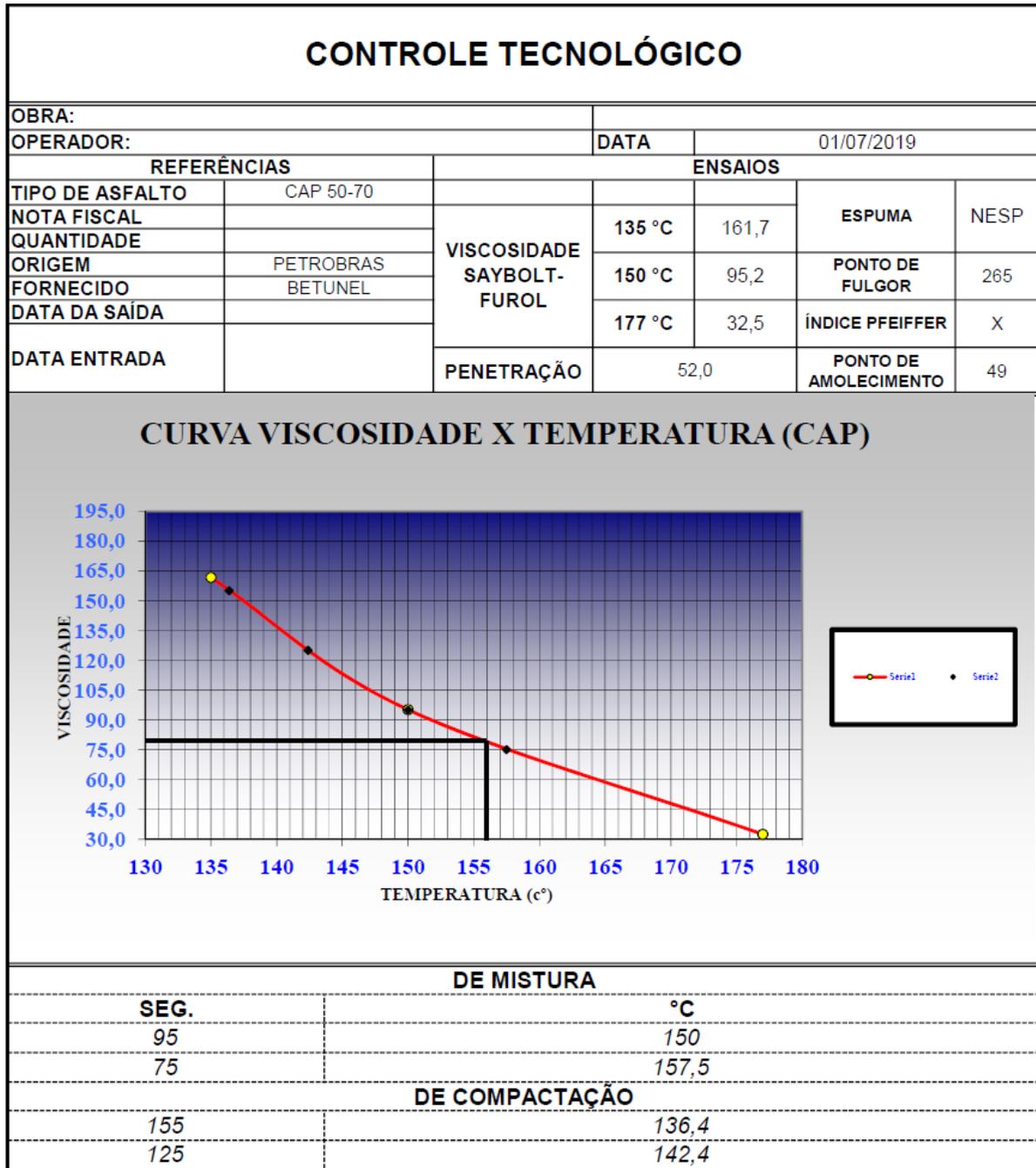
TECMUNDO. **Legó**, 2019. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/lego>>. Acesso em: 30 maio 2019.

VENCELINO, Rosa Maria et al. Ensaios para avaliação de embalagens plásticas rígidas. Campinas: CETEA/ITAL, 1998.

VICK: Telhas de Policarbonato, 2019. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/prod/e/telhas-em-policarbonato-vick_551_34382>. Acesso em: 20 out. 2019.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.

ANEXO A – VISCOSIDADE



APÊNDICE A – DADOS DA DOSAGEM MARSHALL DE REFERÊNCIA

| DADOS DOS CPS | | h médio (mm) | Massa seca (g) | Massa submersa (g) | Volume | Dens. Apar. (Gmb) | Dens. Média Aparente |
|---------------|------|--------------|----------------|--------------------|--------|-------------------|----------------------|
| AMOSTRA | CAP | | | | | | |
| 1 | 4,5% | 73,65 | 1188,8 | 629,1 | 559,70 | 2,118 | 2,121 |
| 2 | | 73,78 | 1198,8 | 640,5 | 558,30 | 2,141 | |
| 3 | | 73,60 | 1186,7 | 624,3 | 562,40 | 2,104 | |
| 4 | 5% | 71,60 | 1200,7 | 643,3 | 557,40 | 2,148 | 2,124 |
| 5 | | 73,78 | 1196,0 | 631,0 | 565,00 | 2,111 | |
| 6 | | 73,18 | 1200,6 | 634,0 | 566,60 | 2,113 | |
| 7 | 5,5% | 73,08 | 1195,6 | 632,8 | 562,80 | 2,118 | 2,120 |
| 8 | | 72,78 | 1192,6 | 632,0 | 560,60 | 2,121 | |
| 9 | | 72,08 | 1192,4 | 631,6 | 560,80 | 2,120 | |
| 10 | 6% | 72,58 | 1189,3 | 625,3 | 564,00 | 2,103 | 2,132 |
| 11 | | 70,50 | 1194,3 | 639,5 | 554,80 | 2,146 | |
| 12 | | 70,35 | 1192,8 | 638,9 | 553,90 | 2,147 | |
| 13 | 6,5% | 69,50 | 1192,3 | 644,0 | 548,30 | 2,168 | 2,152 |
| 14 | | 71,50 | 1194,0 | 638,0 | 556,00 | 2,141 | |
| 15 | | 69,90 | 1185,6 | 635,0 | 550,60 | 2,147 | |

| AMOSTRA | TEOR | Fc | Força Lida (Kgf) | Força Lida (mm) | Força Corrigida (Kgf) | Estabilidade (Kgf) | FLUÊNCIA (mm) |
|---------|------|-------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|---------------|
| 1 | 4,5% | 0,804 | 660 | 0,66 | 1338,5 | 1076 | 2,8 |
| 2 | | 0,801 | 580 | 0,58 | 1178,5 | 944 | 1,1 |
| 3 | | 0,804 | 605 | 0,605 | 1228,5 | 988 | 3,0 |
| 4 | 5% | 0,842 | 580 | 0,58 | 1178,5 | 992 | 3,7 |
| 5 | | 0,801 | 515 | 0,515 | 1048,5 | 840 | 1,5 |
| 6 | | 0,812 | 485 | 0,485 | 988,4 | 803 | 2,2 |
| 7 | 5,5% | 0,814 | 630 | 0,63 | 1278,5 | 1041 | 4,7 |
| 8 | | 0,819 | 590 | 0,59 | 1198,5 | 982 | 3,5 |
| 9 | | 0,833 | 680 | 0,68 | 1378,5 | 1148 | 1,7 |
| 10 | 6% | 0,823 | 625 | 0,625 | 1268,5 | 1044 | 3,6 |
| 11 | | 0,863 | 800 | 0,8 | 1618,1 | 1397 | 2,7 |
| 12 | | 0,866 | 770 | 0,77 | 1558,2 | 1350 | 4,6 |
| 13 | 6,5% | 0,884 | 695 | 0,695 | 1408,5 | 1245 | 5,0 |
| 14 | | 0,844 | 630 | 0,63 | 1278,5 | 1079 | 4,3 |
| 15 | | 0,875 | 665 | 0,665 | 1348,5 | 1181 | 3,3 |

**APÊNDICE B – DADOS DA DOSAGEM MARSHALL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO
PLÁSTICO**

| DADOS DOS CPS | | | h médio (mm) | Massa seca (g) | Massa submersa (g) | Volume | Dens. Apar. (Gmb) | Dens. Média Aparente |
|---------------|------|------|-----------------|-------------------|--------------------------|--------|-------------------------|----------------------------|
| AMOSTRA | CAP | RP | | | | | | |
| 1 | 5,7% | 0,5% | 69,39 | 1187,8 | 644,0 | 543,80 | 2,178 | 2,176 |
| 2 | | | 69,49 | 1196,0 | 644,3 | 551,70 | 2,162 | |
| 3 | | | 68,52 | 1190,5 | 648,2 | 542,30 | 2,189 | |
| 4 | 5,7% | 1% | 68,14 | 1168,0 | 629,0 | 539,00 | 2,161 | 2,146 |
| 5 | | | 70,70 | 1193,7 | 636,0 | 557,70 | 2,134 | |
| 6 | | | 70,30 | 1193,7 | 638,6 | 555,10 | 2,144 | |
| 7 | 5,7% | 1,5% | 66,02 | 1103,7 | 583,0 | 520,70 | 2,113 | 2,102 |
| 8 | | | 73,49 | 1190,4 | 619,5 | 570,90 | 2,079 | |
| 9 | | | 72,09 | 1199,4 | 633,3 | 566,10 | 2,113 | |
| 10 | 5,7% | 2% | 73,31 | 1191,8 | 623,5 | 568,30 | 2,091 | 2,100 |
| 11 | | | 71,07 | 1191,5 | 632,6 | 558,90 | 2,126 | |
| 12 | | | 74,54 | 1198,3 | 624,4 | 573,90 | 2,082 | |
| 13 | 5,7% | 2,5% | 74,08 | 1207,0 | 625,2 | 581,80 | 2,069 | 2,083 |
| 14 | | | 73,38 | 1199,3 | 627,0 | 572,30 | 2,090 | |
| 15 | | | 72,80 | 1203,8 | 629,8 | 574,00 | 2,091 | |

| AMOSTRA | TEOR | RP | Fc | Força Lida (Kgf) | Força Lida (mm) | Força Corrigida (Kgf) | Estabilidade (Kgf) | FLUÊNCIA (mm) |
|---------|------|------|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------|
| 1 | 5,7% | 0,5% | 0,804 | 660 | 0,66 | 1338,5 | 1075,6 | 2,8 |
| 2 | | | 0,801 | 580 | 0,58 | 1178,5 | 944,4 | 1,1 |
| 3 | | | 0,804 | 605 | 0,61 | 1228,5 | 988,3 | 3,0 |
| 4 | 5,7% | 1% | 0,842 | 580 | 0,58 | 1178,5 | 991,9 | 3,7 |
| 5 | | | 0,801 | 515 | 0,52 | 1048,5 | 840,2 | 1,5 |
| 6 | | | 0,812 | 485 | 0,49 | 988,4 | 802,7 | 2,2 |
| 7 | 5,7% | 1,5% | 0,814 | 630 | 0,63 | 1278,5 | 1040,7 | 4,7 |
| 8 | | | 0,819 | 590 | 0,59 | 1198,5 | 982,2 | 3,5 |
| 9 | | | 0,833 | 680 | 0,68 | 1378,5 | 1147,7 | 1,7 |
| 10 | 5,7% | 2% | 0,823 | 625 | 0,63 | 1268,5 | 1044,2 | 3,6 |
| 11 | | | 0,863 | 800 | 0,80 | 1618,1 | 1396,9 | 2,7 |
| 12 | | | 0,866 | 770 | 0,77 | 1558,2 | 1349,9 | 4,6 |
| 13 | 5,7% | 2,5% | 0,884 | 695 | 0,70 | 1408,5 | 1244,7 | 5,0 |
| 14 | | | 0,844 | 630 | 0,63 | 1278,5 | 1078,5 | 4,3 |
| 15 | | | 0,875 | 665 | 0,67 | 1348,5 | 1180,6 | 3,3 |

APÊNDICE C – TABELA DE GRANULOMETRIA DA MISTURA

| Composição (%) | | 21,0 | 24,0 | 55,0 | 100 | Especificação | |
|----------------|-------|---------|---------|-------|---------|---------------|-----|
| Peneira | (mm) | BRITA 1 | BRITA 0 | PÓ | FAIXA C | Min | Max |
| 1 1/2" | 38,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 1" | 25,4 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 3/4" | 19,05 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100 | 100 |
| 1/2" | 12,7 | 38,6 | 100,0 | 100,0 | 87,1 | 80 | 100 |
| 3/8" | 9,525 | 10,7 | 100,0 | 100,0 | 81,2 | 70 | 90 |
| No 4 | 4,76 | 1,4 | 17,2 | 97,1 | 57,8 | 44 | 72 |
| No 10 | 2 | 1,4 | 1,7 | 65,0 | 36,5 | 22 | 50 |
| No 40 | 0,42 | 1,3 | 1,5 | 24,5 | 14,1 | 8 | 26 |
| No 80 | 0,18 | 1,1 | 1,3 | 10,7 | 6,4 | 4 | 16 |
| No 200 | 0,075 | 1,0 | 1,1 | 5,7 | 3,6 | 2 | 10 |

APÊNDICE D – REGISTRO FOTOGRÁFICO DOS ENSAIOS NO LABORATÓRIO

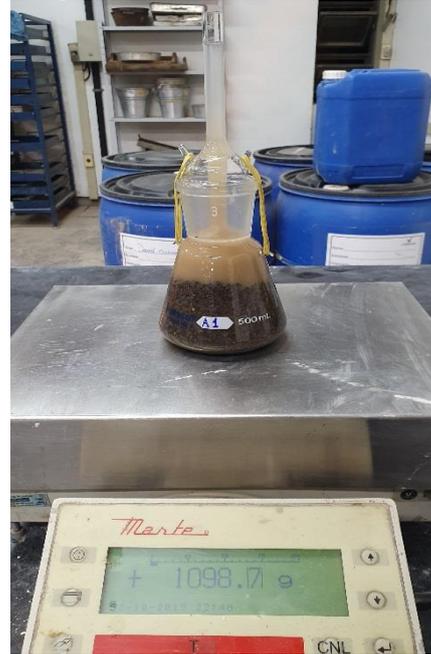
Conferência da temperatura de mistura do CA



Resíduo plástico utilizado no CA



Ensaio de densidade do agregado miúdo



Mistura de CA com a adição de RP



Asfalto de referência X Asfalto com RP



CP's confeccionados

