



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

LEANDRA LIBÓRIO COSTA VASCONCELOS

MISTURA ASFÁLTICA COM RESÍDUOS DE PEAD

Manaus

2020

LEANDRA LIBÓRIO COSTA VASCONCELOS

MISTURA ASFÁLTICA COM RESÍDUOS DE PEAD

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Materiais

Linha de pesquisa: Pavimentação

Orientadora: Profa. Dra. Consuelo Alves da Frota

Manaus

2020

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

Vasconcelos, Leandra Libório Costa
V331m Mistura asfáltica com resíduos de PEAD / Leandra Libório Costa
Vasconcelos . 2020
81 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Consuelo Alves da Frota
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Concreto asfáltico. 2. Resíduos de PEAD. 3. Resistência à tração
por compressão diametral. 4. Módulo de resiliência. I. Frota, Consuelo
Alves da. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

LEANDRA LIBÓRIO COSTA VASCONCELOS

MISTURA ASFÁLTICA COM RESÍDUOS DE PEAD

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Consuelo Alves da Frota
Universidade Federal do Amazonas- Examinadora Interna

Profa. Dra. Daniela Menegon Trichês
Universidade Federal do Amazonas- Examinadora Interna

Prof. Dr. Newton Silva de Lima
Centro Universitário Luterano de Manaus- Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primordialmente a Deus, pela força, coragem e fé! Aos meus pais, Arlinda e Odorico Cleidson, meus irmãos Kethere, Leanne, Israel, Rafael e Daniel, meus filhos amados Marcos Gabriel, Jonathas e Maria Joana, e ao meu esposo e amor Jonas Vasconcelos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela fé, perseverança e amor, pois sem estas sementes do Criador, eu não estaria aqui, concluindo mais uma etapa que irá trazer benefícios para a minha carreira profissional. Obrigada meu Deus por não desistir de mim nos momentos de dor e tristeza e gratidão por todos aqueles que o Senhor permitiu que passassem em minha vida durante esta trajetória no PPGCEM.

Aos meus pais, Odorico Cleidson e Arlinda Libório, pelo amor, carinho e confiança a mim depositados. Agradeço aos meus irmãos Leanne, Israel, Rafael e Daniel, pela nossa linda união e amor, que nos tornam uma família tão abençoada e feliz.

Sou grata aos meus filhos, Marcos Gabriel, Jonathas e Maria Joana, pelo amor incondicional, pela palavra mãe, e pela mulher que me tornei em cada nascimento, durante esta trajetória de vida acadêmica e gestação, quando o nascimento do Marcos Gabriel marcou o início da Graduação de Engenharia Civil, o nascimento do Jonathas a conclusão, e Maria Joana no curso de pós-graduação para encerrar o circuito acadêmico.

Ao meu esposo Jonas Vasconcelos, pelas palavras de incentivo, pela festa surpresa, que realizou com a minha família e amigos, para que eu não deixasse de acreditar, que já sou uma vencedora, não importa o resultado! Agradeço a dedicação e cuidados aos nossos filhos durante esta fase final do mestrado, a paciência, por suportar as noites mal dormidas, por aconselhar no momento certo, e por respeitar, a mulher que sou. Eu amo muito você e nossa penca de filhos.

À Maria Josenilda, não só pela amizade, mas pelo amor, dedicação e cuidado ao longo destes sete anos com meus filhos e minha casa.

À minha “mana” Anne Karollynne Castro, pela ajuda nos estudos, auxílios e dicas nos ensaios laboratoriais e nas preparações de aula. Anne, obrigada pelo seu bom humor e suas palavras de conforto, pois elas me ajudavam, quando eu pensava que tudo estava perdido. Que a nossa amizade persista por muitos anos!

À minha orientadora, Consuelo Alves da Frota, palavras são insuficientes para agradecer, por todos os conselhos e ensinamentos adquiridos ao longo desta pesquisa ao seu lado. A minha admiração que antes era limitada à profissional Doutora Consuelo, agora, vai além, chegando à mulher, esposa e mãe Consuelo. A senhora é minha maior inspiração. Obrigada mais uma vez pela confiança e pelo carinho. Minha eterna gratidão por tudo!

Ao meu amigo, Alemar Torres, que foi um dos incentivadores da busca deste título. Não posso deixar de agradecer a outros colegas que me ajudaram durante este processo: minha amiga Elaine Figueiredo, pelo apoio e admiração; Igor Nonato pelos ensinamentos em

laboratório e pela amizade; ao colega Carlos Fábio Cortezão pela parceria durante as aulas de Pavimentos. Obrigada a todos os colegas e amigos que direta ou indiretamente ajudaram-me a concretizar este sonho.

Agradeço à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) que me proporcionou a realização de mais um sonho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), a e ao PPGCEM, em especial ao Prof. Dr. Edgar que permitiu a minha continuidade ao programa depois da minha licença maternidade. Serei eternamente grata!

À construtora ARDO que forneceu sua dosagem e os agregados para a pesquisa realizada em misturas asfálticas.

Agradeço à Axtron Serviços Tecnológicos que permitiu através da atividade que desempenho na empresa, criar o principal objetivo desta pesquisa e, ao mesmo tempo, me permitiu o direito de dedicação ao mestrado.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, que conduziram, muito bem, as minhas atividades durante minha ausência.

“Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”

(Josué 1:9)

RESUMO

Em conformidade com o Fundo Mundial para a Natureza (WWF) (2019), o Brasil é o quarto maior produtor de lixo plástico no mundo, com cerca de 11,3 milhões de toneladas, posição inferior relativo aos Estados Unidos, China e Índia. Desse montante, coletaram-se mais de 10,3 milhões de toneladas (91%), e somente 145 mil toneladas (1,28%) foram efetivamente recicladas, ficando bem abaixo da média global de 9% concernente a reciclagem plástica. Em outra vertente, tem-se os dados provenientes do Anuário Estatístico Consolidado da Confederação Nacional de Transporte (CNT), em 2019, que classificou 1.046 km de rodovias pavimentadas no Estado do Amazonas, em regular (65,59%), ruim (7,55%) e péssimo (26,86%). Tal resultado aliado à preservação ambiental motivam o emprego de resíduos na construção de pavimentos asfálticos, objeto do presente trabalho. Nesse contexto, avaliou-se o comportamento mecânico de misturas asfálticas alternativas com resíduo de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), nos teores de 1% e 2%, em substituição ao agregado miúdo, pó de pedra. Tal material originou-se do descarte pós-consumo de tubos de PEAD, procedentes da instalação de ramais prediais na cidade de Manaus. A mistura asfáltica referência, do tipo Concreto Asfáltico (CA), seguiu uma das dosagens aplicadas em serviços de pavimentação da Prefeitura Municipal de Manaus (PMM). Determinou-se o comportamento mecânico desses compósitos de acordo com os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR), submetidos às temperaturas de 25°C e 40°C. Os resultados evidenciaram que os valores da relação MR/RT para as formulações com resíduos poliméricos, respeitante à mistura referência, mostraram-se inferiores à temperatura de 25°C, e discretamente superiores na temperatura igual a 40°C. Porém, destaca-se que no comparativo do conjunto dos resultados concernente à citada razão, as composições alternativas assinalaram menores valores, em altas temperaturas, alusivo a temperatura de 25°C. Conseqüentemente, melhor comportamento quanto à elasticidade e à resistência à tração em temperaturas similares a regional. Pelo exposto, pode-se concluir que o emprego de resíduos de PEAD, como agregado miúdo, revelaram satisfatórios resultados, consoante aos aspectos técnicos e ambientais para serviços de pavimentação.

Palavras-chave: Concreto Asfáltico; Resíduos de PEAD; Resistência à Tração por Compressão Diametral; Módulo de Resiliência.

ABSTRACT

In accordance with the Worldwide Fund for Nature (WWF) (2019), Brazil is the fourth largest producer of plastic waste in the world, with about 11.3 million tons, a lower position in relation to the United States, China, and India. Of this amount, over 10.3 million tons (91%) are collected, but only 145 thousand tons (1.28%) are actually recycled, well below the global average of 9% regarding plastic recycling. In another aspect, the Consolidated Statistical Yearbook of the National Transport Confederation (CNT) in 2019 classified 1,046 km of paved highways in the State of Amazonas as regular (65.59%), poor (7.55%) and terrible (26.86%). This result combined with environmental preservation motivates the use of residues in the construction of asphalt pavements, which is the object of this study. Hence, the mechanical behavior of alternative asphalt mixtures with High Density Polyethylene (HDPE) residue was evaluated, in ratios of 1% and 2%, replacing the fine aggregate, which is stone powder. Such a material originated from the post-consumer disposal of HDPE tubes, from the installation of building extensions in the city of Manaus. The reference asphalt mix, which is of Asphaltic Concrete (AC) type, followed one of the dosages applied in paving services of the Municipality of Manaus (PMM). The mechanical behavior of these composites was determined according to the Tensile Strength by Diametral Compression (TS) and Resilience Modulus (RM) tests, submitted to temperatures of 25 °C and 40 °C. The results showed that the RM/TS ratio values for the formulations with polymeric residues in comparison to the reference mixture were lower at the temperature of 25 °C, and slightly higher at the temperature of 40 °C. However, it was remarked that when comparing the set of results concerning the aforementioned ratio, the alternative compositions presented lower values at high temperatures, alluding to the temperature of 25 °C. Consequently, a better behavior with regard to elasticity and tensile strength at temperatures similar to the region's is observed. From the above, it can be concluded that the use of HDPE waste as a fine aggregate revealed satisfactory results for paving services depending on technical and environmental aspects.

Keywords: Asphaltic Concrete; HDPE waste; Tensile Strength by Diametral Compression; Resilience Modulus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Instalação de ramal predial na via pavimentada em Manaus.....	17
Figura 2.1- (a) Designação mínima para tubos de PE, (b) Marcação hot stamping.....	24
Figura 2.2- Tubos de PEAD em bobinas de 100m revestida com filmes de PEAD	24
Figura 2.3- Volume total coletado por tipo de material (toneladas, % do total)	26
Figura 2.4- Volume coletado dos resíduos plásticos (toneladas)	27
Figura 2.5- <i>PlasticRoad</i> , primeira ciclovia de plástico do mundo na Holanda.....	27
Figura 2.6- Resistência à Compressão dos corpos de prova (média)	29
Figura 2.7- Caracterização física de ligantes de uso comercial e modificados	30
Figura 2.8- Morfologia dos ligantes produzidos com PEAD (esquerda) e EVA (direita)	31
Figura 2.9- Polímeros triturados	32
Figura 2.10- Agregados revestidos com polímeros	32
Figura 2.11- Agregados revestidos com polímeros	34
Figura 3.1- a) Brita 1 b) Brita 0 c) Pó de Pedra.....	36
Figura 3.2- Areia média.....	36
Figura 3.3- Uso de tubo de PEAD em serviços de ligação de água: (a) tubos de PEAD separados para os serviços, (b) tubo de PEAD no ramal predial de ligação, (c) descarte de pedaços de tubo de PEAD em caixas coletoras, após consumo, (d) resíduos de tubo PEAD manipulado.....	41
Figura 3.4- Processo do resíduo de PEAD	42
Figura 3.5- Resíduos de tubo PEAD triturado no moinho 1 (a), passado na peneira 4,8mm (b)	42
Figura 3.6- Resíduo de PEAD, passado pelo moinho PIOVAN	43
Figura 3.7- Processo de homogeneização da mistura asfáltica	46
Figura 3.8- Aglomeração de resíduo de PEAD	46
Figura 3.9- Processo de compactação dos espécimes Marshall	47
Figura 3.10- Ensaio de Resistência à Tração na UTM 14	48
Figura 3.11- Ensaio de Módulo de Resiliência na UTM 14.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.1- Curvas granulométricas dos agregados.....	51
Figura 4.2- Resíduos de PEAD triturado passado na # 4,75mm	52
Figura 4.3- Mistura Referência na Faixa A (DNIT 031/2006).....	54
Figura 4.4- Mistura Referência na Faixa B (DNIT 031/2006)	55
Figura 4.5- Mistura Referência na Faixa C (DNIT 031/2006)	55
Figura 4.6- Valores da RT para os compósitos	57

Figura 4.7- Desempenho da RT para os compósitos a 25°C	58
Figura 4.8- Desempenho de RT para os compósitos a 40°C	58
Figura 4.9- Perda de RT nos compósitos de 25°C a 40°C.....	59
Figura 4.10- Valores de MR para os compósitos	60
Figura 4.11- Valores de MR para Mistura Referência a 25°C	61
Figura 4.12- Valores de MR da Mistura Referência a 40°C	61
Figura 4.13- Valores do MR da Mistura PEAD (1%) a 25°C	62
Figura 4.14- Valores do MR da Mistura PEAD (1%) a 40°C	63
Figura 4.15- Valores do MR da Mistura PEAD (2%) a 25°C	64
Figura 4.16- Valores do MR da Mistura PEAD (2%) a 40°C	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- - Produção e Reciclagem de Plástico no Mundo (números em tonelada).....	15
Tabela 1.2- Quantidade Utilizada de Tubos PEAD em serviços de abastecimento de água em 2019	16
Tabela 2.1- Principais diferenças estruturais e físico-químicas entre PEAD e PEBD	20
Tabela 2.2- Classificação dos polietilenos pela ASTM D-1248	20
Tabela 2.3- Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD	22
Tabela 2.4- Classificação de CA modificado por polímeros.....	31
Tabela 3.1- Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração.....	39
Tabela 4.1- Especificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	50
Tabela 4.2- Coeficiente de Uniformidade e de Curvatura dos materiais.....	52
Tabela 4.3- Densidade dos agregados	Erro! Indicador não definido.
Tabela 4.4- Propriedades de engenharia do Polietileno de Alta Densidade (PEAD).....	53
Tabela 4.5- Parâmetros Volumétricos da Mistura Referência.....	56
Tabela 4.6- Mistura da Prefeitura de Manaus e Misturas com adição do PEAD	56
Tabela 4.7- Influência da Temperatura no MR da Mistura Referência.....	62
Tabela 4.8- Influência da Temperatura no MR na Mistura PEAD (1%).....	63
Tabela 4.9- Influência da Temperatura no MR da Mistura PEAD (2%).....	65
Tabela 4.10- Relação MR/RT para as Misturas asfálticas a 25°C	67
Tabela 4.11- Relação MR/RT para as Misturas asfálticas a 40°C	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AAUQ	Areia asfalto usinada a quente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
AMP	Asfalto Modificado por polímero
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso usinado a quente
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CP	Corpo de Prova
DE	Diâmetro Externo Nominal
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EVA	Etileno Acetato de Vinila
GEOTEC	Grupo de Geotecnia
Gsa	Densidade real
Gsb	Densidade aparente
Gsbssd	Densidade aparente na condição superfície saturada
HDPE	High-density polyethylene
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
LLDPE	Linear low density polyethylene
MR	Módulo de Resiliência
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno linear de baixa densidade
PEUAPM	Polietileno de ultra alto peso molecular
PEUBD	Polietileno de ultra baixa densidade
PET	Polietileno tereftalato
PMO	Pressão Máxima de Operação
PN	Pressão Nominal
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
RBV	Relação Betume/Vazios

RT	Resistência à tração por compressão diametral
SBS	Estireno-butadieno-Estireno
UHMWPE	Ultra high molecular weight polyethylene
ULDPE	Ultra low density polyethylene
UTM	Universal Testing Machine
VAM	Vazios do Agregado Mineral
Vv	Vazios do Agregado Mineral

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	CONCRETO ASFÁLTICO (CBUQ/CA)	19
2.2	POLIETILENO (PE)	19
2.3	POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE – PEAD	21
2.4	RECICLAGEM	25
2.5	PLÁSTICOS NO PAVIMENTO.....	26
2.6	MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM POLÍMERO.....	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	MATERIAIS.....	36
3.1.1	Agregados	36
3.1.2	Ligante Asfáltico	39
3.1.3	Resíduos de PEAD	40
3.2	DOSAGEM DAS MISTURAS	43
3.2.1	Moldagem dos corpos de prova	44
3.3	COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	50
4.1.1	Ligante Asfáltico	50
4.1.2	Agregados	50
4.1.3	Dosagem das Misturas Asfálticas	54
4.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	56
4.2.1	Resistência à Tração (RT).....	57
4.2.2	Módulo de Resiliência (MR)	59
4.2.2.1	Mistura Referência	60
4.2.2.2	Misturas Alternativas.....	62

4.2.2.3 Composições pesquisadas e da literatura.....	65
4.3 RELAÇÃO MR/RT	66
5 CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

O plástico é uma invenção do homem que gerou benefícios significativos para a sociedade. A produção crescente se deve pelo seu baixo custo, versatilidade e confiabilidade deste material. Tais aspectos incentivam o desenvolvimento de mais de 300 tipos de plásticos, convertendo-os em uma conveniência descartável de uso único. De acordo o Fundo Mundial para a Natureza (2019) (WWF), o Brasil situa-se no quarto maior produtor de lixo plástico no mundo, com 11,3 milhões de toneladas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia. Desse montante, mais de 10,3 milhões de toneladas foram coletadas (91%), mas apenas 145 mil toneladas (1,28%) foram efetivamente recicladas, ficando bem abaixo da média global de reciclagem plástica que é de 9%, conforme ilustra a Tabela 1.1.

Tabela 1.1- Produção e Reciclagem de Plástico no Mundo (números em tonelada)

País	Total de lixo plástico gerado	Total incinerado	Total reciclado	Relação produção e reciclagem
Estados Unidos	70.782.577	9.060.170	24.490.772	34,60%
China	54.740.659	11.988.226	12.000.331	21,92%
Índia	19.311.663	14.544	1.105.677	5,73%
Brasil	11.355.220	0	145.043	1,28%
Indonésia	9.885.081	0	362.070	3,66%
Rússia	8.948.132	0	320.088	3,58%
Alemanha	8.286.827	4.876.027	3.143.700	37,94%
Reino Unido	7.994.284	2.620.394	2.513.856	31,45%
Japão	7.146.514	6.642.428	405.834	5,68%
Canadá	6.696.763	207.354	1.423.139	21,25%

Fonte: World Wide Fund for Nature (2019). Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 10 de agosto de 2020.

Específico ao Polietileno, tem sido muito empregado em transmissão de água potável, particularmente em ramais prediais (tubulação que liga a rede de distribuição de água ao dispositivo de medição de consumo). Esse polímero apresenta vantagens pela sua flexibilidade, baixo preço, facilidade de instalação e resistência à corrosão. Seu tipo mais usado é o Polietileno de Alta Densidade – PEAD (JANSON, 2003; LJUNBERG, 2003; PERES, 2005)

O PEAD chegou ao Brasil por volta do ano de 1974, por meio da parceria de empresas brasileiras com a indústria química alemã Hoechst AG. O projeto era de uma adutora de água para a Companhia de Saneamento do Amazonas (COSAMA), e consistia em uma tubulação de 900 mm de diâmetro e 3.600 metros de comprimento, apoiada até 60 metros de profundidade no leito do Rio Negro (MARCONDES, 2016).

A aplicação de PEAD em sistemas de abastecimento de água é uma realidade consolidada nos últimos anos no Brasil, como é o caso do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) de Porto Alegre, que utiliza o material há 25 anos. Também a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), desde 1976, já usava o PEAD, bem como a Odebrecht Ambiental da cidade de Limeira, que empregava tubos com esse material desde 2007 (MARCONDES, 2016).

A Águas de Manaus/AEGEA, concessionária responsável pelos serviços de água e esgoto de Manaus, capital do Estado do Amazonas, vem utilizando Tubos PEAD nos últimos anos em vários segmentos do setor de abastecimento de água, que englobam: novas ligações de água, normalização e substituição de ramais prediais, religações de água e remanejamento de ramais prediais. Em 2019, a supracitada concessionária empregou um total 114.513,58 metros de tubo PEAD, sendo 107.861,51 m (95%), com diâmetro externo de 20mm, em ramais prediais. Os tubos com diâmetro de 32 mm, 5.245,97 m (4%) e de 63 mm, 1.406,10 m (1%), foram destinados às redes de distribuição, como ilustra a Tabela 1.2.

Tabela 1.2- Quantidade Utilizada de Tubos PEAD em serviços de abastecimento de água em 2019

Mês de Referência	Tubo PEAD 20mm	Tubo PEAD 32mm	Tubo PEAD 63mm	Quantidade utilizada total em metros
Janeiro	4.275,90	71,00	82,00	4.428,90
Fevereiro	4.110,50	140,00	92,00	4.342,50
Março	4.451,80	22,00	43,20	4.517,00
Abril	4.964,60	39,00	30,00	5.033,60
Mai	5.264,25	289,00	111,30	5.664,55
Junho	4.701,20	682,40	181,60	5.565,20
Julho	12.958,85	998,00	425,30	14.382,15
Agosto	14.558,60	649,00	79,80	15.287,40
Setembro	22.009,24	1.207,30	128,00	23.344,54
Outubro	14.797,77	650,27	92,90	15.540,94
Novembro	8.478,80	274,00	57,00	8.809,80
Dezembro	7.290,00	224,00	83,00	7.597,00
Total	107.861,51	5.245,97	1.406,10	114.513,58

Fonte: Dados retirados do sistema GSSONLINE/AEGEA/Relatório TMA 14: Usuário Leandra.vasconcelos

O sistema de rede de abastecimento e ramais prediais de responsabilidade da concessionária Águas de Manaus / AEGEA, são em sua maioria, enterrados, necessitando para suas instalações e manutenções, escavações de solo bruto e demolições de vias pavimentadas. Durante a execução de serviços de manutenção ou instalação, são inevitáveis a geração de

resíduos, em decorrência do tipo de atividade e materiais empregados, no caso, sobras de tubo PEAD, como identificado na Figura 1.1.

Figura 1.1- Instalação de ramal predial na via pavimentada em Manaus



Fonte: Autor (2020)

Em outra vertente, tem-se que a pavimentação de vias, urbanas e rurais, é uma forma de integração social, econômica, e cultural, ou seja, mostra-se necessária as diversas atividades humanas, como meio de transporte, distribuição das produções e cargas. Além disso, deve apresentar condições adequadas de uso, garantindo conforto e segurança. A sua implantação requer qualidade para garantir segurança e eficiência aos seus usuários.

A infraestrutura rodoviária é um dos modais de transportes mais utilizada em nosso país, assertiva consubstanciada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2014, que cita “o transporte rodoviário é predominante no Brasil”. Ressalta-se, no entanto, que os estados da Região Norte se distinguem pela má qualidade de suas rodovias, enquanto a Região Centro-sul se destaca pelos benefícios que as concessões rodoviárias podem garantir à qualidade do pavimento, caso das estradas concessionadas do Estado de São Paulo.

O Anuário Estatístico Consolidado da Confederação Nacional de Transporte (CNT), de 2019 menciona que 59% das rodovias brasileiras foram avaliadas como regulares, ruins ou péssimas. Para a Região Norte, e, particularmente, no Estado do Amazonas verificaram-se que dos 1.046 km de rodovias pavimentadas, resultou: regular (686 km, 65,59%), ruim (79 km, 7,55%) e péssimo (281, 26,86%). No cenário de 2018, o julgamento apontou: ótima (0,92%), regular (39,58%), ruim (26,01%), e péssima (33,49%).

A infraestrutura de transporte rodoviário vivencia uma realidade bastante desafiadora com o aumento significativo do tráfego e de cargas. Ainda segundo a CNT (2019), a malha

rodoviária cresceu 0,5% em 10 anos, enquanto a frota de veículos aumentou 74,1%. Assim, consubstanciando a necessidade de investimento que clama por soluções inovadoras, para atender a requisitos de desempenho estrutural, custos e prazos.

Destaca-se que em maio de 2019, a Prefeitura Municipal de Manaus (PMM), iniciou a implantação do Projeto de Requalificação Urbana e Viária na Cidade de Manaus – REQUALIFICA MANAUS. Tal projeto contempla investimentos para melhoria da infraestrutura urbana e viária de Manaus, visto que um dos principais problemas da expansão urbana desenfreada é a saturação das principais vias, ocasionado pelo aumento significativo da frota de veículos em circulação, sendo agravado pelo fluxo intenso, depreciando as estruturas dos pavimentos viários que entrecortam a cidade, sendo vitais para a circulação e a mobilidade urbana (PMM, 2018).

Nesse contexto, o presente trabalho estudou a viabilidade da adição do resíduo de PEAD em misturas asfálticas, a partir de ensaios laboratoriais, visando contribuir para minimizar os impactos ambientais causados pela disposição final inadequada desse material e, além disso, melhorar o comportamento mecânico do revestimento asfáltico regional com soluções técnicas-econômicas e ambientais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho mecânico de um compósito asfáltico do tipo Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CA), com a incorporação de resíduos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), oriundos da reciclagem de tubos utilizados em ramais prediais de abastecimento de água.

1.1.2 Objetivos Específicos

Realizar a dosagem das misturas asfálticas a partir de uma composição empregada em serviços de pavimentação na cidade de Manaus.

Determinar o comportamento mecânico da mistura asfáltica CA referência e das composições alternativas com resíduos de PEAD, por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) e do módulo de resiliência (MR).

Avaliar o uso de resíduos de PEAD como uma solução eficiente na pavimentação regional e uma alternativa eficaz para destinação final de resíduos plásticos pós-consumo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO ASFÁLTICO (CBUQ/CA)

O pavimento consiste em um conjunto de subcamadas e o revestimento com dimensões finitas destinadas a transmitir os esforços verticais e tangenciais oriundos do tráfego dos veículos, tendo o mesmo a capacidade de fornecer aos usuários condições de rolamento com conformo, economia e segurança (KIM, 2009).

Específico aos revestimentos asfálticos, conforme Arao (2016), são constituídos por uma associação entre agregados e ligante betuminoso. Também Barros (2017) cita que as misturas asfálticas resultam da combinação de agregados pétreos e cimento asfáltico de petróleo (CAP), envolvidos a elevadas temperaturas, podendo ocorrer casualmente a adição a esta combinação de um modificador/melhorador para alterar as propriedades da mistura convencional.

De acordo Choe e Kim (2013), o revestimento tipificado como Concreto Asfáltico (CA) são formulações de uma matriz polimérica formada por ligante asfáltico, agregados minerais e vazios de ar. Conforme Shaw (1980), o concreto asfáltico deve possuir alta rigidez para resistir à deformação permanente.

2.2 POLIETILENO (PE)

Polímeros são macromoléculas compostas por unidades repetitivas. O nome é derivado do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). São sintetizados a partir de moléculas simples, chamados monômeros, por um processo denominado polimerização (RAMOS, 2007). Igualmente são chamados de intramoleculares, pela relação das ligações dentro de uma mesma molécula. A ligação simples covalente C-C é mais comum na maioria dos polímeros. Segundo Canevarolo (2010), o polietileno possui sua cadeia principal formada por esse tipo de ligação. Cita também o autor que consiste em um plástico do tipo termoplástico, “que ao ser submetido a um aumento substancial da temperatura e pressão, amolecem e fluem, permitindo ser moldados. Ao ser retirada a solicitação de temperatura e pressão se solidificam adquirindo a forma do molde”.

Polietileno (PE) é um polímero parcialmente cristalino, flexível, cujas suas propriedades são influenciadas pela quantidade das fases amorfas e cristalinas, mostrando-se inerte face à maioria dos produtos químicos comuns, pela sua característica parafínica, (COUTINHO *et al.*, 2003). Mencionam ainda sobre os tipos de PE, quais sejam: Polietileno de Baixa Densidade (PEBD ou LDPE), Polietileno de Alta Densidade (PEAD ou HDPE), Polietileno Linear de

Baixa Densidade (PELBD ou LLDPE), Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM ou UHMWPE), Polietileno de Ultra Baixa Densidade (PEUBD ou ULDPE).

Um comparativo realizado por Canevarolo (2010), aborda a diferença estrutural básica entre o PEBD e o PEAD, em que o primeiro possui uma cadeia ramificada aleatória, e o segundo se constitui de uma cadeia linear. Assim, resulta numa elevada variação de características físico-químicas e propriedades, como listado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Principais diferenças estruturais e físico-químicas entre PEAD e PEBD

Tipo de cadeia		PEAD	PEBD
		Linear	Ramificada
Ramificações	Longa (por molécula)	~ zero	< 1
	Curta (por 1000 átomos de C)	C2	20
		C4	< 1
Densidade (g/cm ³)		0,95 ~ 0,96	0,92 ~ 0,93
Temperatura de fusão (C°)		135	110
Porcentagem de cristalinidade (%)		90	60
Resistência à Tração (MPa)		20 - 38	4 - 16
Elongação na ruptura (%)		200 - 500	100 - 200
Elongação na ruptura (%)		200 - 500	100 - 200

Fonte: Canevarolo (2010)

Em conformidade com a norma americana ASTM D-1248 (Standard Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials for Wire and Cable), os polietilenos são plásticos ou resinas preparadas pela polimerização de etileno. A classificação do plástico de polietileno é realizada com base em duas características, a densidade e a taxa de fluxo (fusão índice). Na Tabela 2.2, tem-se as densidades dos PE para o tipo I, II e III, sendo considerados os mesmo para as especificações ASTM D-4976 (Specification for Polyethylene Plastic Molding and Extrusion Materials) e ASTM D-3350 (Specification for Polyethylene Plastic Pipe and Fittings Materials).

Tabela 2.2- Classificação dos polietilenos pela ASTM D-1248

Tipo	Densidade (g/cm ³)
I - LDPE e LLDPE (ou PEBD e PELBD)	0,910 - 0,925
II - MDPE e LMDPE (ou PEAD e PELMD)	0,926 - 0,940
III - HDPE (ou PEAD)	0,941 - 0,965

Fonte: Canevarolo (2010)

2.3 POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE – PEAD

Consoante Canevarolo (2010), o PEAD soma-se aos polímeros termoplásticos convencionais (produção em larga escala), que se caracterizam pelo baixo custo e nível de exigência mecânica, além da facilidade de processamento. Da produção total de polímeros no mundo, 90% correspondem aos termoplásticos.

A linearidade das suas cadeias e conseqüentemente a maior densidade, torna a sua orientação, alinhamento e empacotamento mais eficientes. Verificam-se em suas propriedades mecânicas, uma forte influência do peso molecular, do teor de ramificações, da estrutura morfológica e orientação. Enfatiza-se que, a orientação interfere na rigidez do polímero, na cristalinidade e resistência à tração. No caso do peso molecular, altera o desempenho da resistência ao impacto (COUTINHO *et al.*, 2003). Na Tabela 2.3 visualizam-se as principais propriedades do PEAD.

Na Tabela 2.3 visualizam-se as principais propriedades para o tipo de PEAD altamente linear, que possui um baixo nível de ramificações, com alta densidade e alta força intermolecular, sob a ação de catalisadores sua produção está na faixa de temperatura de 20 a 80°C, possui característica de longas moléculas lineares, e é altamente cristalino sendo acima de (90%). Alusivo ao PEAD de baixa ramificação, este possui reação exotérmica, que somada a altas pressões conduz uma grande quantidade de ramificações à cadeia, este tipo de ramificação dificulta o ordenamento eficiente das moléculas durante sua cristalização, fazendo que o PEAD consista em um polímero parcialmente cristalino (50-60%). Suas principais características são: resistência ao impacto, flexível, transparência, inerte e processamento fácil; podendo ser aplicado como filmes para embalagens, peças transparentes, embalagens diversas, revestimento de fios e cabos, sacolas etc.

Ainda na supracitada tabela 2.3, tem-se a propriedade de dureza dos polímeros, obtido por penetração e por meio dos métodos Brinell e Rockwell. Em particular, a Dureza Rockwell, é um método simples de medição direta de dureza altamente utilizado em indústrias de polímeros e metais. A dureza é obtida através da diferença entre a profundidade de penetração resultante da aplicação de uma pequena carga, seguida por outra de maior intensidade. Quanto a especificação Rockwell, o índice de dureza e o símbolo da escala como valor da carga devem ser indicados. A dureza é designada pelo símbolo HR seguido pela identificação apropriada da escala (A, B, C, D, E, F, G, H, K) (MGS INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE PLÁSTICOS, 2020).

Tabela 2.3- Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD

Propriedades	Unidade	Altamente linear	Baixo grau de ramificação
Densidade	g/cm ³	0,962 – 0,968	0,950 – 0,960
Índice de refração	-	1,54	1,53
Temperatura de fusão	°C	128 – 135	125 – 132
Temperatura de fragilidade,	°C	-140 - -70	-140 - -70
Condutividade térmica	W/(m.K)	0,46 – 0,52	0,42 – 0,44
Calor de combustão	kJ/g	46,0	46,0
Constante dielétrica à 1 MHz	-	2,3 – 2,4	2,2 – 2,4
Propriedades	Unidade	Altamente linear	Baixo grau de ramificação
Resistividade superficial	Ω	1015	1015
Resistividade volumétrica	Ω.m	1017 – 1018	1017 – 1018
Resistência dielétrica	kV/mm	45 – 55	45 -55
Ponto de escoamento	MPa	28 - 40	25 - 35
Módulo de tração	MPa	900 - 1200	800 – 900
Resistência à tração	MPa	25 - 45	20 – 40
Alongamento	%		
No ponto de escoamento		5 - 8	10 - 12
No ponto de ruptura		50 - 900	50 - 1200
Dureza			
Brinell	MPa	60 - 70	50 – 60
Rockwell	-	HR55, D60 – D70	-
Resistência ao cisalhamento	MPa	20 - 38	20 - 36

Fonte: Coutinho *et al.*, (2003)

A utilização do PEAD vem se expandindo por diferentes segmentos da indústria de transformação de plásticos, abrangendo os processamentos de extrusão e moldagem seja por sopro ou injeção. Específico ao uso por extrusão, são fabricados os polidutos. Tubos para redes de saneamento e de distribuição de gás, emissários de efluentes sanitários e químicos, dutos para mineração e dragagem, sacos para lixo e sacolas de supermercados (COUTINHO *et al.*, 2003).

2.3.1 PEAD em Ramais Prediais

Conforme a TUBOS PEAD MG (2020) existem vários tipos de Polietileno, de acordo com a sua densidade, quais sejam, baixa, média e alta, mas somente alguns tipos específicos servem para a fabricação de tubos. Analisa-se o seu desempenho por testes de pressão a temperaturas elevadas (80°) para simular uma vida útil de 50 anos, tendo por finalidade determinar a resistência (tensão hidrostática) do material à pressão no fim de sua vida útil. Tais

experimentos demoram 10 mil horas (mais de um ano). Dentre os tipos de polietilenos, o PEBD é utilizado para tubos de pequenos diâmetros (9 a 32 mm) e de baixa pressão (4 bar), com finalidade de irrigação, onde se necessita muita flexibilidade, baixa resistência à pressão e a esforços mecânicos. No caso do PEAD é usado para a maioria dos tubos de pressão (16 a 1600 mm), sendo mais rígido e possui maior resistência à pressão. Destaca-se que o PEMD é muito parecido com PEAD. Possuem praticamente a mesma resistência, porém é um pouco mais flexível.

Na publicação da SABESP (NTS 048), alude-se que os tubos de polietileno destinados à execução de ramais prediais possuem paredes lisas com polímeros a base de polietileno de alta densidade e resinas do tipo PE 80 ou PE 100. Além disso, contém aditivos antioxidantes, estabilizantes e pigmentação azul. São fornecidos em tubos de diâmetro externo nominal DE 20 e DE 32, que confeccionam as bobinas (Figura 2.1); e apresentam-se com máxima pressão de operação de 1 MPa, para temperaturas de até 25°C. Ressalta-se que a norma NBR 15.561 (ABNT, 2017) estabelece para tubos com essa finalidade, diâmetro externo nominal (DE) de 20, 25 e 32 mm, coloração preta ou azul como identificação, e densidade mínima ou igual a 0,935 g/cm³ a temperatura de 23 °C.

Para Peres (2005), os tubos de polietileno são obtidos por extrusão de resinas na forma de pó ou grânulos e as taxas de controle de velocidade de resfriamento interferem, entre outros aspectos importantes, na orientação molecular e grau de cristalinidade. A extrusão é um processo mecânico, em que o material é forçado através de uma matriz projetada para a peça adquirindo assim essa forma pré-determinada.

Segundo o Manual Técnico Kanalis (2016), os tubos de Polietileno são designados pelos termos: Diâmetro Externo Nominal (DE), simples número que serve para classificar em dimensões os elementos de tubulações e que corresponde aproximadamente ao diâmetro externo do tubo em milímetros; Máxima Pressão de Operação (MPO), máxima pressão que a tubulação deve suportar em serviço contínuo; Pressão Nominal (PN), máxima pressão a que os tubos, conexões e respectivas juntas podem ser submetidos em serviço contínuo, nas condições de temperatura de operação de até 25 °C.; SDR (*standard dimension ratio*), simples número que serve para classificar em dimensões os elementos de tubulações (tubos, juntas, conexões e acessórios). Corresponde à relação entre diâmetro externo nominal (DE) e a espessura de parede. Na Figura 2.1, mostra-se a designação mínima dos tubos de PEAD, marcado de maneira indelével (*hot stamping*) no mínimo a cada metro, com os seguintes dizeres: Nome/Marca do Fabricante - Norma de Fabricação - Classificação do Material (PE 80, PE 100, PP-R) - Diâmetro

Externo (DE) - Espessura (mm) – PN ou SDR ou ambos - lote de fabricação. Na Figura 2.2, mostra-se uma das formas de fornecimento dos tubos, sendo em barras para DE 75 a 125, e bobinas para DE 20 a DE 63, com comprimentos de 50 ou 100 metros. Para a cor dos tubos designam-se como: Preto PE 80 e 100 para água e aplicações gerais e exposto ao tempo e azul PE 80 e 100 para água, somente para tubos enterrados.

Figura 2.1- (a) Designação mínima para tubos de PE, (b) Marcação hot stamping



Fonte: Fabricante (2020)

Figura 2.2- Tubos de PEAD em bobinas de 100m revestida com filmes de PEAD



Fonte: Autor (2020)

A principal vantagem do emprego dos tubos de PEAD em ramais prediais de água, deve-se a sua elevada resistência ao impacto e a flexibilidade. Denota-se ainda sua relevância na aplicabilidade de serviços de saneamento básico, porquanto possui elevada resistência à abrasão, corrosão e resistência química. Apresenta-se igualmente como um material atóxico e de baixa incrustação (POLIERG, 2019).

Enfatizam-se ainda os benefícios da aplicação de tubos de PEAD no transporte de água:

atoxidade, grande resistência ao impacto, grande flexibilidade (propicia curvas longas), total resistência à corrosão, leveza, facilidade de manuseio/instalação, menor custo de preparação e menor dimensão de valas (Tubos PEAD MG, 2020).

2.4 RECICLAGEM

O Ministério do Meio Ambiente define reciclagem como:

A reciclagem é um conjunto de técnicas de reaproveitamento de materiais descartados, reintroduzindo-os no ciclo produtivo. É uma das alternativas de tratamento de resíduos sólidos (lixo) mais vantajosas, tanto do ponto de vista ambiental quanto do social: ela reduz o consumo de recursos naturais, poupa energia e água, diminui o volume de lixo e dá emprego a milhares de pessoas (BRASIL, 2020).

A reciclagem de materiais tem-se tornado uma atividade extremamente importante em termos ambientais, sociais e econômicos. Contribui na geração de emprego, no aumento da renda e preservação de fontes esgotáveis de matéria-prima, conseqüentemente, colabora na redução de gastos com a disposição final de resíduos sólidos.

Nessa temática, tem-se a geração do lixo. Conforme o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2020), uma solução aos problemas relacionados a esse assunto, é aplicação dos princípios dos 3R's – Reduzir, Reutilizar e Reciclar, que visam a preservação e não-geração de resíduos, somados a padrões de consumo sustentável, economia de recursos naturais e contenção do desperdício.

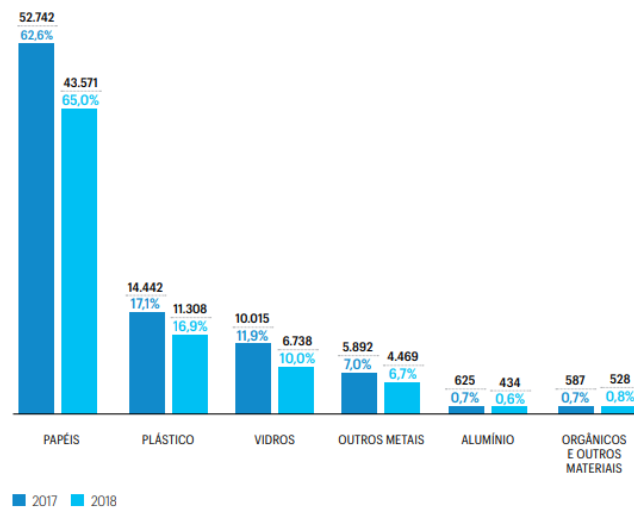
Segundo Alves (2016 apud ANJOS, 2019), a política de sustentabilidade dos 3 R's, objetivam minimizar o desperdício de materiais e produtos, além de poupar a natureza. Também menciona o autor que, em torno de 50% de todo plástico produzido se torna resíduo sólido em cerca de 3 anos. Estima que um terço é lançado na natureza. Portanto, gerando um grande problema.

De acordo com a ABRELPE (2019), em 2018, geraram-se no Brasil 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). Um aumento de pouco menos de 1% em relação ao ano anterior. Desse montante, 92% (72,7 milhões) foi coletado, e 6,3 milhões de toneladas foram recolhidas junto aos locais de geração. O Norte, região com menor densidade populacional do Brasil, produziu 16.073 toneladas de RSU por dia, dos quais 81,31% aconteceram por coletas. Desse quantitativo, nos 450 municípios da região, mais de 4 mil toneladas diárias se direcionaram aos lixões, retratando um percentual de 35%, que representa o maior índice entre todas as regiões do país.

Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) estabeleceu instrumentos para implementar o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de

vida dos produtos. Um deles é a logística reversa, destinada a viabilizar o reaproveitamento dos resíduos sólidos no processo produtivo, e assim diminuir o envio de materiais para a disposição no solo (ABRELPE, 2019). Conforme dados do Panorama de Reciclagem da ABRELPE, 67mil toneladas de resíduos recicláveis foram coletadas por cooperativas e associações de catadores. Na Figura 2.3 observa-se o volume de materiais recicláveis coletados em 2017 e 2018 pelas cooperativas e associações de catadores, acompanhadas pela Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (ANCAT).

Figura 2.3- Volume total coletado por tipo de material (toneladas, % do total)

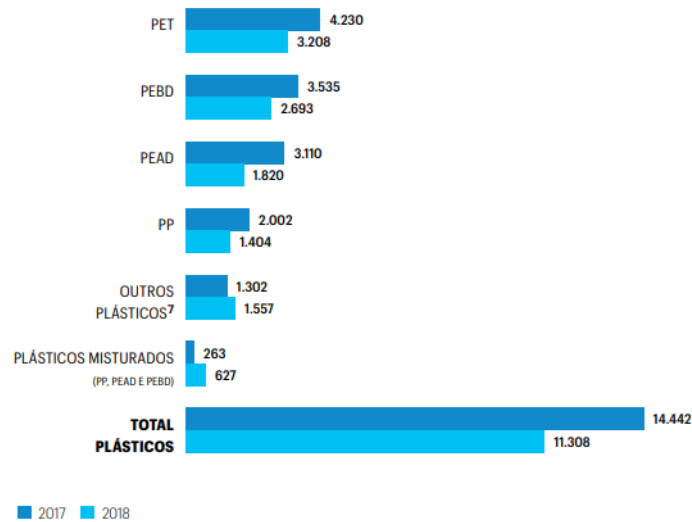


Fonte: Anuário de Reciclagem (2019)

2.5 PLÁSTICOS NO PAVIMENTO

Consoante a ANCAT, o plástico se constitui no principal material recolhido pelos seus associados. Fazem referência a coleta de 26 mil toneladas, somente nos anos de 2017 e 2018, o que representa 17% de todo material arrecadado, ficando atrás apenas do papel (Figura 2.4) (ABRELPE, 2019). Conforme Anjos (2019), o Brasil é o quarto maior produtor de plástico do mundo e conseqüentemente, um grande consumidor deste material.

Figura 2.4- Volume coletado dos resíduos plásticos (toneladas)



Fonte: Anuário de Reciclagem (2019)

Dentre as utilizações do plástico, sobressai o conceito *PlasticRoad*. Desenvolvido na Holanda por três empresas (KfW, Wavin e Total), consiste em uma estrutura rodoviária pré-fabricada, modular e oca baseada em plásticos reciclados. O projeto piloto foi lançado em 11 de setembro de 2018 com uma ciclovia de 30 metros (Figura 2.5). Os resultados desse projeto mostraram que é possível construir estradas com resíduos plásticos reciclados. Destaca-se que, cada estrutura piloto contém cerca de 1000 kg de plásticos reciclados, o equivalente a 218.000 copos plásticos. A versão piloto da *PlasticRoad* já reduziu as emissões de CO₂ em cerca de 50 a 70%, em comparação com ciclovias de asfalto, (PLASTICROAD, 2020).

Figura 2.5- *PlasticRoad*, primeira ciclovia de plástico do mundo na Holanda

Fonte: Site da Plasticroad (2020). Disponível em: <https://www.plasticroad.eu/wp-content/uploads/2020/05/KWS-AK3A1049-1-scaled.jpg>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.

Destaca-se igualmente aditivos produzidos pela empresa MacRebur®, para serem misturados ao asfalto, denominados MR06, MR08 e MR10, tendo cada um uma aplicação específica (ANJOS, 2019). Alude o autor que, para cada km de uma via usam-se 684.000 garrafas plásticas ou 1,8 milhões de sacolas plásticas finas usadas nos supermercados, bem como uma 1 tonelada de sua mistura asfáltica contém o equivalente a 80.000 garrafas plásticas. Conclui mencionando que as estradas construídas com esse aditivo se tornam, em até 60%, mais duradouras e resistentes.

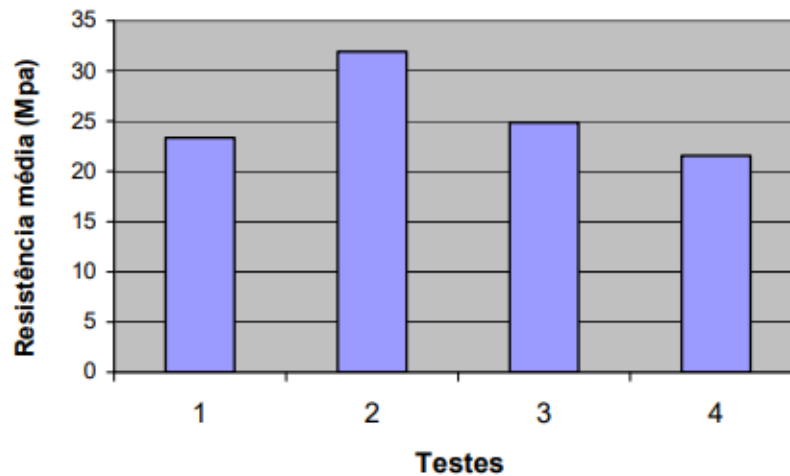
No Brasil, duas estudantes gaúchas do ensino médio, Letícia Camargo Padilha, e Samantha Karpe, criaram juntas o “*Poliway*”, um asfalto inovador e ecológico, que segundo a explicação de uma das autoras do projeto científico, tem como característica:

O *Poliway* é cerca de cinco vezes mais resistente que os pavimentos convencionais. Enquanto um asfalto normal se rompe, ao suportar mil quilos, o *Poliway* aguenta cerca de cinco mil quilos e se deforma três vezes menos. Além disso, nosso produto é, aproximadamente, 15% mais barato que o pavimento convencional e, em relação a material, cerca de 50%. Tudo isso com a vantagem de preservar o meio ambiente, trazer mais segurança, evitando acidentes e salvando vidas (INSTITUTO DE ENGENHARIA, 2016).

O resíduo polimérico utilizado por elas para fabricação do *Poliway* é o PEAD, amplamente utilizado em embalagens de shampoo, amaciante e químicos em geral. (RIBEIRO, 2016, apud ANJOS, 2019).

Pareja *et al.* (2009) analisaram a resistência a compressão do concreto com PEAD, nas proporções de 7%, 9% e 11%, em substituição à areia na formação de traços padrões estabelecidos pelas normas brasileiras (NBR 5739/90). O PEAD adquirido de uma empresa de reciclagem do Município de Campo Mourão-PR foi aproveitado, isento de contaminantes, na forma de grânulos de tamanho aproximado de 5mm. Conforme a figura 2.6, os resultados apontaram que o traço 2, produzido com 7% de PEAD, assinalou os maiores valores relativo ao concreto normal, traço 1, e as dosagens com 9% PEAD, traço 3. Salienta ainda os autores que a resistência mínima exigida para concreto estrutural reside em um valor acima de 15 MPa, e para pavimentos, visando circulação de pedestres e veículos leves, valor acima de 7,5 MPa. Finalizam indicando que é possível produzir concreto com PEAD reciclado, para a construção de muros de casas, “paver”, blocos para calçadas, e pequenas construções que não exijam elevados esforços estruturais.

Figura 2.6- Resistência à Compressão dos corpos de prova (média)



Fonte: Pareja *et al.*, (2009)

Costa *et al.* (2016) examinaram as propriedades mecânicas de resistência à tração e resistência ao impacto de resíduos reciclados de embalagens de polietileno de alta densidade (PEAD) com PEAD comercial. Por meio dos testes de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) afirmaram a equivalência, quanto a RT, entre as amostras com PEAD reciclado e comercial.

Caraschi e Leão (2002) avaliaram as propriedades dos polímeros reciclados (PP, PEAD) e de uma mistura de plásticos (PEAD, PEBD, PP e PS), com referência aos polímeros virgens, nas temperaturas por injeção iguais a 180, 190 e 200 °C. Verificaram resultados satisfatórios dos plásticos reciclados em confronto aos plásticos virgens. Tais subprodutos, obtido de artefatos descartáveis e potencialmente recicláveis resultam em regra um material leve, resistente e de baixo custo, podendo competir em diversas aplicações com os termoplásticos virgens. Em conformidade com Silva *et al.* (2014), a utilização de resíduos plásticos, ao invés de polímeros virgens, identifica-se como uma solução ambiental e economicamente sustentável, mas que obriga a um estudo mais cuidadoso desses materiais para garantir um desempenho adequado.

Portanto, a política de revalorização da natureza por meio da preservação ambiental, induz à busca por formas de aproveitamento dos recursos naturais e dos subprodutos industriais como alternativas de materiais sustentáveis para o emprego na construção civil, caso dos pavimentos. Nesse contexto, tem-se outros diversos trabalhos com materiais reciclados, em que se destacam: Resíduo de Construção e Demolição (RCD) (OSSA, GÁRCIA e BOTERO, 2016), Materiais Cerâmicos (CHOUDHARY, KUMAR e GUPTA, 2020), Borracha de Pneu

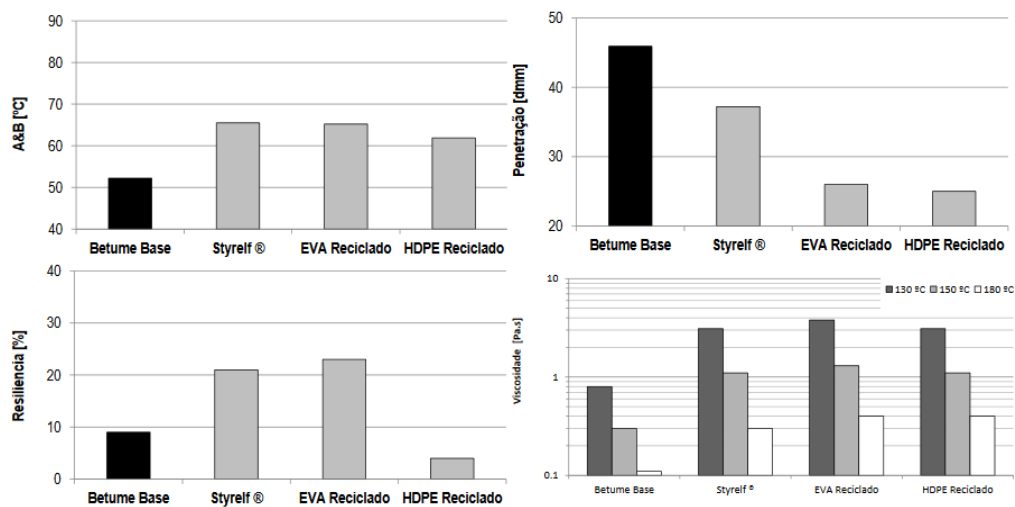
(MERIGHI e SUZIKIS, 2017), Nanoargila (CARLESSO, 2017), Agregado Siderúrgico (TAVARES, 2012) e Material Asfáltico Fresado (GENNESSEAU, 2015).

2.6 MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM POLÍMERO

Embora o conceito de mistura betuminosa modificada com polímeros não seja novo, registram-se poucos estudos de polímeros à base de resíduos plásticos em concretos asfálticos, como medida de melhoria de desempenho. Além disso, falta a realização de mais pesquisas comparativas do comportamento do CA modificado por vários materiais à base de polímeros (KHURSHID et. al., 2019).

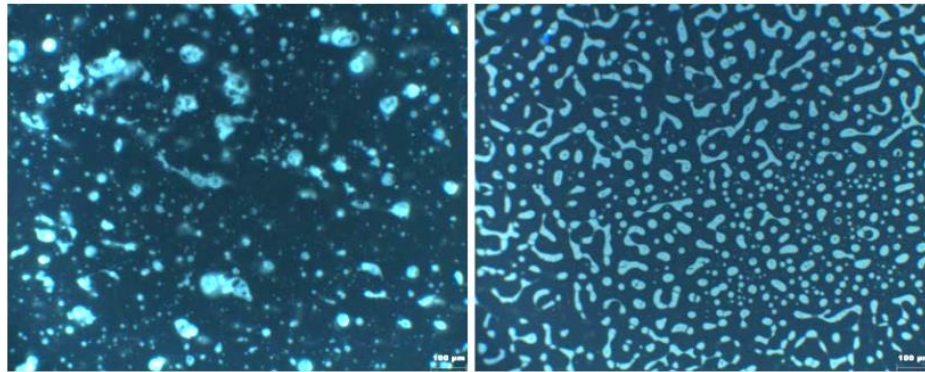
Nos estudos de Silva *et al.* (2014), compararam as principais propriedades físicas, morfológicas e reológicas de betumes aditivados por resíduos plásticos de PEAD e EVA, relativo a um betume base 35/50 e um betume comercial modificado (STYRELF®). Produziram-se os ligantes modificados com uma percentagem de 5% de resíduo plástico, em peso do betume, no misturador IKA RW20, segundo uma interação de 1 hora e temperatura de 180 °C. Adicionaram-se os resíduos de PEAD e de EVA em forma de pó e de acordo com dimensões iniciais $\leq 4\text{mm}$. Os autores obtiveram as seguintes principais conclusões, para ambos os resíduos: aumentam a temperatura de fusão, diminuem a penetração, crescem a viscosidade do ligante às temperaturas de produção e aplicação, e aumentam o módulo complexo e a temperatura de fusão. A Figura 2.7 retrata os dados obtidos na citada pesquisa e a Figura 2.8 mostra a morfologia dos ligantes com esses resíduos poliméricos.

Figura 2.7- Caracterização física de ligantes de uso comercial e modificados



Fonte: Silva *et al.*, (2014)

Figura 2.8- Morfologia dos ligantes produzidos com PEAD (esquerda) e EVA (direita)



Fonte: Silva *et al.*, (2014)

Ainda com referência às misturas asfálticas modificadas, tende-se os estudos de viabilidade econômica e técnica realizados por Khurshid *et al.* (2019). Confrontaram o desempenho do concreto asfáltico (CA) modificado por PEBD de sacos, PEAD de garrafas plásticas e Pó de Borracha de pneus (PB) (Figura 2.9), na granulometria em torno de 4,75 mm. Aferiu a adição desses materiais por dois processos: revestindo o agregado (método seco), conforme retrata a Figura 2.10, e inserido no ligante (processo úmido). Analisaram-se as propriedades das composições pelo método Marshall. Dosaram-se as formulações com as seguintes composições: agregados revestidos com um teor de 10% (PEBD, PEAD e PB) e 8% (PEBD e PEAD) (Figura 2.10). Conforme se observa na Tabela 2.4, o PEAD obteve maior relevância entre os parâmetros determinados, referente ao PEBD e o PB, que se posicionaram em segundo e terceiro lugares, respectivamente. Assim como, verificou-se que o Pó de Borracha de pneus mostrou-se como resíduo polimérico mais rentável.

Tabela 2.4- Classificação de CA modificado por polímeros

Parâmetro	PEBD – Mistura modificada	PEAD – Mistura modificada	PB – Mistura modificada
Valor de Abrasão “Los Angeles”	1	2	3
Valor de Impacto	2	1	3
Valor de Fluxo	1	3	2
Valor de Estabilidade	3	1	2
Resistência a deformação	3	1	2
Economia de custo	2	3	1
Custo Médio	2	1.8	2.2

Fonte: Khurshid *et al.*, (2019)

Figura 2.9- Polímeros triturados



Fonte: Khurshid *et al.*, (2019)

Figura 2.10- Agregados revestidos com polímeros



Fonte: Khurshid *et al.*, (2019)

Manoel (2015) analisou asfaltos modificados por polímeros (AMPs) a partir de misturas de CAP (50/70) com PEAD, PEBD e PELBD, nas concentrações de 1% a 7%, relativo às misturas do CAP aditivado com poliestireno-co-butadieno-co-estireno (SBS), na concentração de 4% $m.m^{-1}$. As conclusões observadas foram: a) nas análises por calorimetria exploratória diferencial (DSC), os polímeros apresentaram diferentes graus de cristalinidade e diferentes temperaturas de fusão cristalina. Igualmente que o PEAD possui temperatura de fusão e grau de cristalinidade significativamente superior ao PEBD; b) que a viscosidade é influenciada pela concentração do polímero, pela temperatura, e grau de cristalinidade dos polímeros, c) os índices de susceptibilidade térmica, de modo geral, possuem uma grande sensibilidade com a incorporação de polímeros ao CAP, possibilitando tornar as formulações menos susceptíveis às variações térmicas; d) quanto ao estudo reológico, uma redução no valor do ângulo de fase δ e um aumento do parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$, com a adição dos polímeros, relativamente aos do CAP puro. Ambos os efeitos, dependem da concentração e dos graus de cristalinidade. A adição de PEBD's com graus de cristalinidade mais altos proporcionaram as composições AMP's mais resistentes à deformação permanente e mais elásticas.

Relativo a ligantes asfálticos modificados, Guimarães (2019) examinou o efeito da adição de resíduo de polietileno de alta densidade (PEAD), provenientes de sacolas plásticas, em teores de 1, 2, 3%, e de borracha de pneus reciclados, em teores de 13 e 15%, ao ligante asfáltico convencional 50/70. Constatou que, a adição de PEAD e borracha de pneus atuam como agentes redutores de perda de massa, de modo a diminuir a volatilização do CAP modificado, que o torna mais resistente ao enrijecimento. Fundamentado nos usuais ensaios, Ponto de Amolecimento e Ponto de Fulgor, observou que CAP's modificados com menor teor de borracha e maiores teores de PEAD apresentaram menor envelhecimento e maior resistência às deformações permanentes, em temperaturas altas, comparadas ao CAP 50/70 convencional. Assim, a adição de até 3% do PEAD particulado resultou em uma fusão efetiva entre o material asfáltico e o polímero. Para os maiores teores do PEAD e menores teores de borracha, houve um aumento da consistência e da resistência ao afundamento de trilha de roda. A amostra com a inserção de 13% de borracha + 3% de PEAD registrou o melhor desempenho dentre os ligantes modificados. O autor exemplifica que, a modificação de 1 litro de CAP foram necessárias 25 sacolas plásticas.

Candian (2007), estudou a aplicabilidade do polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado (péletes verde e branco) em elementos estruturais. Obtiveram que o módulo de Elasticidade do PEAD reciclado, 805 MPa, e a Resistência à compressão, 26,20 MPa, ficaram próximos dos valores encontrados na literatura para PEAD puro, e inferior ao do concreto e da madeira. Segundo os autores, controlando as deficiências por adição de cargas minerais e fibras de elevado módulo e resistência, “o PEAD reciclado pode ser aplicado como elemento estrutural”.

Chandrawal *et al.* (2016) avaliaram a deformação permanente (*rutting*) de misturas asfálticas, pelo Método Marshall, contendo borracha de pneu fragmentada (5%, 10%, e 15%) como modificador de betume e agregados revestidos com resíduos de plástico (PEBD) nos teores de 3%, 6%, 9%. A mistura CRMB, com 10% de borracha fragmentada e 6% PEBD, mostrou a composição mais estável. Baseado no estudo, as seguintes conclusões foram tiradas: a) a proporção ideal (10%) de adição de borracha em pó melhorou as propriedades das misturas, embora modificações adicionais por agregados revestidos com PEBD tenham assinado melhorias relativo à mistura convencional; b) as misturas modificadas com borracha em pó com plástico agregados revestidos apresentou maior resistência a deformação respeitante à formulação convencional; c) diminuição considerável do teor de betume na mistura pelo uso de borracha fragmentada e plástico. Daí o uso de tais misturas modificadas reduziriam o custo do

projeto significativamente com a reutilização de resíduos.

Coura (2018) examinou as propriedades térmicas e mecânicas de quatro compósitos com PEAD e rejeitos de mineração de ferro de barragens, na proporção 80/20. O processo de homogeneização dos compósitos ocorreu por equipamentos de mistura contínua e/ou em batelada (Drais). Os compósitos produzidos com PEAD e rejeitos de mineração resultaram em materiais com maior estabilidade térmica e resistência mecânica.

Costa *et al.* (2013) avaliaram as possíveis vantagens da modificação de betumes com diferentes resíduos plásticos (PEAD, PEBD, ABS, EVA e borracha de pneu reciclados) alusivos aos ligantes com SBS e EVA e CAP puro. Os polímeros aplicados neste estudo são apresentados na Figura 2.11. As principais conclusões foram: a) a participação do SBS, PEAD e EVA apresentaram melhores resultados concernentes ao Ponto de Amolecimento. Em relação à resiliência destacaram-se o SBS e EVA; e c) os materiais PEAD e EVA obtiveram mais influência nos resultados da Penetração.

Figura 2.11- Agregados revestidos com polímeros



Fonte: Costa *et al.*, (2013)

Hinisliog̃lu e Ag̃ar (2003) estudaram a utilização de diversos resíduos plásticos (em pó) contendo PEAD, como modificador de betume para concreto asfáltico. Concluíram que os aglutinantes asfálticos modificados com PEAD reciclados a 4% forneceram a melhor resistência a deformação permanente, contribuindo para a proteção do meio ambiente.

Hamedi *et al.*, (2020), investigaram os efeitos da propriedade do polímero de polietileno de alto peso molecular (PEUAPM), como aditivo modificador do betume. As amostras foram preparadas com teores de 2 e 4% de PEUAPM (por peso do aglutinante de asfalto) com adição ao betume PG 64-16. Os resultados apontaram que o PEUAPM, em médias temperaturas,

aumentou a resistência do aglutinante à fadiga e diminuiu a deformação permanente.

Razak (2015) analisou um resíduo de PEAD em flocos como agregado grosso, e a substituição do filer por cinzas volantes em misturas asfálticas a quente. Os ensaios testaram a deformação permanente e a resistência à tração indireta. A partir dos resultados laboratoriais comprovou-se que a deformação permanente mínima e a máxima rigidez ocorreram para a formulação modificada com 4% de PEAD. Ainda segundo o autor, o asfalto modificado atendeu aos padrões de composições asfálticas e proporcionou uma destinação ambientalmente correta aos resíduos sólidos.

Reddy e Venkatasubbaiah (2017), ao pesquisar a resistência à deformação em temperaturas médias e altas, concluíram que aumenta com a adição de modificadores, do tipo PEAD e pó de borracha fragmentada. Nesta investigação foram preparadas amostras em quatro concentrações (3%, 4%, 5% e 6%) de PEAD e três concentrações (5%, 10% e 15%) de pó de borracha. Os teores ideais para a mistura asfáltica mais satisfatória foram 5% do PEAD e 10% do pó de borracha.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Agregados

Integraram a composição do concreto asfáltico os seguintes materiais: agregados convencionais (brita 0, brita 1, pó de pedra e areia), resíduos de tubo PEAD na condição de agregado alternativo, cimento Portland como fíler e o ligante asfáltico tradicional.

Os agregados participantes da mistura asfáltica estudada são de origem granítica, e foram utilizados nas graduações de brita 0 (4,8 mm a 9,5 mm), brita 1 (9,5 mm a 19 mm) e pó de pedra (menor que 4,8 mm). A Figura 3.1 e 3.2 evidencia tais materiais.

Figura 3.1- a) Brita 1 b) Brita 0 c) Pó de Pedra



Fonte: Autor (2020)

Figura 3.2- Areia média



Fonte: Autor (2020)

As composições granulométricas dos agregados graúdos foram analisadas por meio da norma americana ASTM C-127 (*Standard Test Method for Relative Density, Specific Gravity,*

and Absorption of Coarse Aggregate) na determinação da massa específica real (G_{sa}), massa específica aparente (G_{sb}), massa específica superfície saturada seca (Gsb_{ssd}) e a absorção, cujos cálculos seguiram as equações 1 a 4.

$$G_{sa} = \frac{A}{A-C} \quad (1)$$

$$G_{sb} = \frac{A}{B-C} \quad (2)$$

$$Gsb_{ssd} = \frac{B}{B-C} \quad (3)$$

$$Absorção = \left[\frac{(B-A)}{A} \right] \times 100 \quad (4)$$

Onde:

A – Massa da amostra seca (g).

B – Massa saturada de superfície seca (g).

C – Massa da amostra submersa em água (g)

A areia, na condição de agregado miúdo, analisou-se quanto a granulometria pela norma americana da ASTM C-128 (*Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*) obteve-se a Massa Específica Real (G_{sa}), Massa Específica Aparente (G_{sb}) e Absorção, cujos cálculos acompanharam as Equações 5 a 7.

$$G_{sa} = \frac{A}{(B+A-C)} \quad (5)$$

$$Gsb_{ssd} = \frac{S}{(B+S-C)} \quad (6)$$

$$Absorção = \left[\frac{(S-A)}{A} \right] \times 100 \quad (7)$$

Onde:

A – Massa da amostra seca no forno (g);

B – Massa do picnômetro preenchido com água (g);

C – Massa do picnômetro preenchido com água e amostra (g);

S – Massa na condição saturada de superfície seca (g);

Com referência à amostra de fíler, sua massa específica real (G_{sa}) acompanhou a norma ASTM C-188 (*Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*), conforme parâmetros mostrados nas Equações 8 e 9.

$$M_c = M_t - M_a \quad (8)$$

$$\rho = \frac{M_c}{V} \quad (9)$$

Onde:

M_c = massa do fíler (g);

M_t = massa do frasco preenchido por solvente e fíler (g);

M_a = massa do frasco mais solvente para a primeira leitura do nível (g);

V = volume do solvente deslocado (g/cm³).

Por meio das curvas granulométricas determinadas pelo ensaio de granulometria, calculou-se o coeficiente de uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c), obtidos conforme Equações 10 e 11 (DAS, 2015)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (10)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} \times D_{10})} \quad (11)$$

Onde:

D_{60} = Diâmetro do grão que corresponde a 60% do material mais fino;

D_{10} = Diâmetro do grão que corresponde a 10% do material mais fino;

D_{30} = Diâmetro do grão que corresponde a 30% do material mais fino.

Quanto ao parâmetro de dureza do agregado, adotaram-se as recomendações

preconizadas pela norma americana ASTM C 131 (*Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*) para os resultados do Abrasão *Los Angeles*, em conformidade com a Equação 12.

$$Perda\ Percentual = \left[\frac{C-Y}{C} \right] \times 100 \quad (12)$$

Onde:

C = Massa total da amostra seca

Y = Massa da amostra lavada e seca, após o desgaste.

3.1.2 Ligante Asfáltico

Consoante a especificação técnica para Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfálticos (DNIT, 031/2006), estabelece-se para a referida mistura o emprego do cimento asfáltico de petróleo, de acordo com os tipos CAP-30/45, CAP-50/70 e CAP-85/100. No presente trabalho participou na condição de ligante o CAP 50/70. O citado material é comercializado pela Refinaria de petróleo Isaac Sabbá (REMAN), localizada no Município de Manaus (AM), e pertencente à empresa Petróleo Brasileiro S.A (Petrobrás). Sua caracterização acompanhou o preconizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Resolução ANP Nº 19, 2015, e especificação de material - Cimentos asfálticos de petróleo DNIT (095/2006). Na Tabela 3.1 expõem-se os dados oriundos dos seguintes ensaios realizados na citada refinaria: Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade, Índice de Suscetibilidade, Ponto de Fulgor, Solubilidade de Tricloroetileno, Ductilidade e Efeito do Calor e do Ar, seguido da Variação em Massa, Ductilidade, Ponto de Amolecimento e Penetração.

Tabela 3.1- Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração (continua)

Características	Und.	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, (mínimo)	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-furol a 135°C (mínimo)	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102

Tabela 3.2- Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração (conclusão)

Características	Und.	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
a 150°C (mínimo)		90	50	43	36		
a 177°C (mínimo)		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
a 135°C, SP 21, 20rpm (mínimo)		374	274	214	155		
a 150°C, SP 21 (mínimo)		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21 (mínimo)		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de susceptibilidade térmica		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor (mínimo)	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno (mínimo)	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25°C (mínimo)	Cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113

Fonte: DNIT (095/2006)

Alusivo aos ensaios estabelecidos na Tabela 3.1, Silva (2017), descreve os principais objetivos dos testes para a caracterização dos ligantes betuminosos. Para o ensaio de Penetração a 25 °C, estabelece que quanto maior a consistência do cimento asfáltico menor sua penetração. Os testes de viscosidade (Saybolt- Furol e Brookfield), que também trata da consistência do material betuminoso, avalia a resistência ao escoamento. O Ponto de Amolecimento, outro parâmetro para determinação da consistência, verifica a temperatura a partir da qual o material passa a ter consistência propícia ao escoamento. A Susceptibilidade Térmica traduz a sensibilidade do ligante à variação da temperatura. O Ponto de Fulgor determina a temperatura a partir da qual ocorre a liberação de gases inflamáveis por parte do ligante. A Solubilidade no Tricloroetileno define o grau de impurezas contidas no asfalto. A Ductibilidade apresenta a coesão dos asfaltos. Retrata a capacidade do material se alongar na forma de filamento até à ruptura. Finalizando, tende-se os testes de Variação de Massa, Ductibilidade, Variação do Ponto de Amolecimento e Penetração retida, em que se mede a durabilidade do asfalto aos efeitos do envelhecimento.

3.1.3 Resíduos de PEAD

O resíduo usado nas composições asfálticas estudadas obteve-se de tubos de PEAD,

oriundos de bobinas de 50 e 100 metros, com diâmetro externo (DE) de 20mm, na cor azul, utilizados em grande escala em serviços de saneamento básico executados por empresas terceirizadas. Tais organizações são contratadas pela Águas de Manaus/AEGEA, concessionária responsável pelos serviços de água e esgoto de Manaus, capital do Estado do Amazonas.

Na Figura 3.3 pode-se conferir o processo de geração desses resíduos a partir dos serviços de saneamento básico realizados nas vias urbanas da cidade de Manaus. A Águas de Manaus / AEGEA também é responsável pelos serviços de abastecimento de água que englobam: novas ligações de água, normalização e substituição de ramais prediais, religações de água e remanejo de ramais prediais. Ressalta-se que, o mencionado ramal predial é a tubulação compreendida entre a rede pública de distribuição e o hidrômetro ou peça limitadora de vazão, dimensionada e executada pela concessionária Águas de Manaus/AEGEA e suas empresas terceirizadas.

Figura 3.3- Uso de tubo de PEAD em serviços de ligação de água: (a) tubos de PEAD separados para os serviços, (b) tubo de PEAD no ramal predial de ligação, (c) descarte de pedaços de tubo de PEAD em caixas coletoras, após consumo, (d) resíduos de tubo PEAD manipulado



Fonte: Autor (2020)

Na obtenção dos resíduos de PEAD foram necessárias etapas para sintetização das dimensões finais. Inicialmente realizaram-se corte dos tubos de PEAD, que comumente possuem comprimentos variados ao serem retirados após consumo. Posteriormente, esses pedaços foram limpos e cortados manualmente com uma serra para obtenção de porções com comprimentos aproximados de 30 cm, com vista a facilitar o processo de trituração. Após esse

processo passou-se o material obtido por um equipamento que tritura plásticos, denominado Moinho 1. Em seguida, o resíduo de PEAD resultante passa por um novo processo de trituração, agora em um equipamento de Moinho de plásticos rígidos da marca PIOVAN, conforme ilustrado na Figura 3.4.

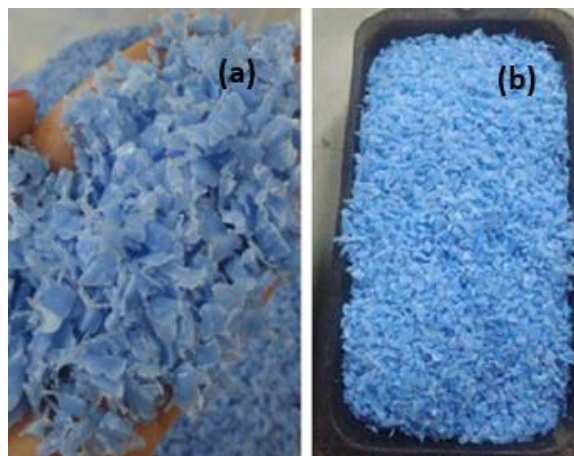
Figura 3.4- Processo do resíduo de PEAD



Fonte: Autor (2020)

Durante o processo de moagem do tubo de PEAD, realizado no moinho 1, foi necessário para a completa redução de tamanho, o material ser triturado por três vezes no equipamento. O resultado desta etapa, apresentou frações em formato achatado e pontiagudo (Figura 3.5, a), dificultando seu peneiramento e baixa quantidade de material passante na peneira 4,8 mm (Figura 3.5, b). Após esta primeira moagem, todos os resíduos foram reunidos novamente, e inseridos em um segundo Moinho, para um novo trituração.

Figura 3.5- Resíduos de tubo PEAD triturado no moinho 1 (a), passado na peneira 4,8mm (b)



Fonte: Autor (2020)

Por fim, no segundo processo de moagem do resíduo de PEAD, material proveniente da

primeira moagem, permitiu um tratamento térmico, modificando significativamente o aspecto visual do resíduo. O resultado do material apresentou característica mais arredondada e sólida, conseqüentemente houve a redução das pontas das partículas, facilitando o processo de peneiramento e quantificação para a pesquisa (Figura 3.6). Na última etapa, os resíduos de PEAD derivados da fase anterior foram passados na peneira com abertura de 4,8 mm, com a finalidade em padronizar sua granulometria, conforme exemplifica a Figura 3.6.

Figura 3.6- Resíduo de PEAD, passado pelo moinho PIOVAN



Fonte: Autor (2020)

3.2 DOSAGEM DAS MISTURAS

Nesta etapa, definiram-se as dosagens das composições de referência e alternativas com base na mistura do tipo Concreto Asfáltico, sendo determinados os parâmetros volumétricos dos corpos de prova pelo Método Marshall, preconizado pela norma americana ASTM D6926 (*Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*).

Para a mistura referência (Tabela 3.2), utilizou-se uma das proporções empregadas pela Prefeitura Municipal de Manaus (PMM) na construção de vias pavimentadas. Visando estudar o comportamento da formulação alternativa, quantitativos do resíduo do PEAD adicionaram-se à composição Referência, substituindo o pó de pedra nas porcentagens iguais a 1% e 2%, obtendo-se, assim, as misturas de CA modificadas e designadas como PEAD 1% e PEAD 2%.

Tabela 3.2- Dosagem de mistura da Prefeitura Municipal de Manaus (PMM) (continua)

Componentes	Referência	PEAD (1%)	PEAD (2%)
Brita 1	14,3%	14,3%	14,3%
Brita 0	28,4%	28,4%	28,4%

Tabela 3.2- Dosagem de mistura da Prefeitura Municipal de Manaus (PMM) (conclusão)

Componentes	Referência	PEAD (1%)	PEAD (2%)
Pó de Pedra	25,4%	24,4%	23,4%
Cimento	3,0%	3,0%	3,0%
Areia	23,7%	23,7%	23,7%
CAP 50/70	5,2%	5,2%	5,2%
PEAD	-	1,0%	2,0%

Fonte: Prefeitura Municipal de Manaus (2020)

Na determinação da massa específica aparente (Gmb), determinou-se o citado parâmetro, acompanhando os critérios da norma ASTM D2726 (*Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*). Para a massa específica máxima medida (Gmm) adotou-se a metodologia Rice (ASTM D2041 - *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*). A partir dos resultados do Gmb e Gmm, calculou-se o volume de vazios (Vv), volume de vazios com betume (VCB), volume de vazios do agregado mineral (VAM) e volume de vazios com ligante (VCB).

3.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Na obtenção dos corpos de prova levaram-se em consideração as proporções, em massa, de cada constituinte da mistura, quais sejam, brita 1, brita 0, areia, pó de pedra, cimento Portland, resíduos de PEAD e CAP 50/70), conforme ilustra a Tabela 3.3. Acompanhando a norma ASTM D 6926, foram necessários cerca de 1200 g para cada espécime de composição asfáltica, resultando na confecção de corpos de prova na forma cilíndrica com 101,6mm de diâmetro e $63,5 \pm 1,3$ mm de altura.

Tabela 3.3- Proporção em massa das misturas (continua)

AMOSTRAS	MATERIAIS						
	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Areia	CAP (50/70)	Fíler (Cimento Portland)	Aditivo (PEAD)
CA Referência Concreto Asfáltico Convencional							
% de materiais na mistura	14,3	28,4	25,4	23,7	5,2	3	-
Massa de materiais na mistura (g)	1200						

Tabela 3.3- Proporção em massa das misturas (conclusão)

AMOSTRAS	MATERIAIS						
	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Areia	CAP (50/70)	Fíler (Cimento Portland)	Aditivo (PEAD)
CA Referência Concreto Asfáltico Convencional							
Massa de materiais por corpo de prova (g)	171,6	340,8	304,8	284,4	62,4	36	0
CA + 1% PEAD Concreto Asfáltico modificado	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Areia	CAP (50/70)	Fíler (Cimento Portland)	Aditivo (PEAD)
% de materiais na mistura	14,3	28,4	24,4	23,7	5,2	3	1
Massa de materiais na mistura (g)	1200						
Massa de materiais por corpo de prova (g)	171,6	340,8	292,8	284,4	62,4	36	12
CA + 2% PEAD Concreto Asfáltico modificado	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Areia	CAP (50/70)	Fíler (Cimento Portland)	Aditivo (PEAD)
% de materiais na mistura	14,3	28,4	23,4	23,7	5,2	3	2
Massa de materiais na mistura (g)	1200						
Massa de materiais por corpo de prova (g)	171,6	340,8	280,8	284,4	62,4	36	24

Fonte: Autor (2020)

Para a Mistura Referência separou-se todo o material com as porcentagens adequadas de agregados e ligante. Assim, os agregados foram aquecidos em estufa a temperatura de 135 °C e o CAP a 120 °C. Indicativo as composições PEAD (1%) e PEAD (2%), além de realizar o mesmo procedimento executado para a Mistura Referência, adicionaram-se os resíduos poliméricos à formulação pelo processo seco. Na mistura e homogeneização usaram-se recipientes padrões preconizados por norma, que se realizaram em um fogareiro, mantendo o aquecimento, até completa cobertura dos agregados pelo ligante (Figura 3.7). Quanto à execução da mistura, pelo processo seco, a literatura mostra ser o preferido em relação a outros, por ser o mais fácil de executar, permitindo uma melhor distribuição dos aditivos e minimizando a aglomeração na mistura (SHEIKHZADEH & HEJAZI 2010, apud VALENÇA, 2012). Ressalta-se que ao tentar submeter os resíduos de PEAD ao pré-aquecimento em estufa, como aconteceu com os agregados, ocorreram aglomerações do material, como ilustra a Figura 3.8.

Figura 3.7- Processo de homogeneização da mistura asfáltica



Fonte: Autor (2020)

Figura 3.8- Aglomeração de resíduo de PEAD



Fonte: Autor (2020)

Após o ligante envolver todos os agregados e estar na temperatura adequada, realizou-se o condicionamento térmico por duas horas em estufa com objetivo de simular o processo de envelhecimento a curto prazo. Tal metodologia acompanhou os trabalhos de Cabral (2017) e Valença (2012), fundamentados na norma ASTM D 4867 (*Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*). Posterior ao citado tratamento térmico, procedeu-se a compactação das misturas no compactador Marshall, em sua forma automática, seguindo o prescrito na norma da ASTM D 6926. Em seguida a compactação, repousaram-se as amostras ainda nos moldes cilíndricos por, no mínimo, 12 horas à temperatura ambiente, de modo a evitar fraturas ou deformações. Finalmente, na sequência, extraíram-se os corpos de prova. A amostra compactada deve ter entre 62,2 e 64,8 mm de altura. A Figura 3.9 ilustra o

procedimento de compactação das amostras, a mistura asfáltica saindo do tratamento térmico, os moldes de compactação pré-aquecidos, o compactador Marshall automático e os espécimes extraídos.

Figura 3.9- Processo de compactação dos espécimes Marshall



Fonte: Autor (2020)

3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Analisaram-se as misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico (CA) ao desempenho mecânico por meio dos ensaios de Resistência à Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR), a seguir abordados.

Examinou-se inicialmente o comportamento mecânico dos compósitos asfálticos por meio da Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT). Thomas (2019), alude que o citado experimento foi desenvolvido pelo Professor Fernando Luiz Lobo Carneiro (1953), durante o deslocamento da igreja de São Pedro, construída em 1732, para a construção da Avenida Presidente Vargas, sendo reconhecido mundialmente como Ensaio Brasileiro. Concernente a teoria do ensaio, são aplicadas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro e estas geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração perpendiculares a essa dimensão. Reconhecido inicialmente na França, passou a ser chamado de "*essai brésilien*". Após aceito pela American Society for Testing Materials (ASTM), em 1962, ficou notório também nos Estados Unidos como "*brazilian test*". Em 1980, foi adotado pela *International Organization for Standardization* (THOMAS, 2019).

Para tal teste, moldaram-se seis corpos de prova para cada mistura, compactados mecanicamente por meio automático no compactador Marshall, com 75 golpes por face, que correlaciona a pressão de pneu na faixa de 7 a 14kgf/cm², e nas temperaturas de 25 °C e de 40 °C. Realizaram-se os testes em conformidade com a norma brasileira do DNIT (136/2018), que preconiza a determinação da resistência à tração indireta em corpo de prova cilíndrico, por

compressão diametral com carregamento estático crescente até a ruptura (monotônico), e o software UTS002 3.12 *Stress Strain Test* da Universal Testing Machine (UTM 14) (Figura 3.10). O valor da carga de ruptura é obtido, calculando-se a resistência à tração indireta do corpo de prova rompido por compressão diametral, pela Equação 13. Segundo a norma DNIT (136/2018), a RT resultante é a média aritmética dos valores obtidos de três corpos de prova, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de $\pm 10\%$.

$$\sigma_t = \frac{2P}{100\pi Dh} \quad (13)$$

Onde:

σ_t – Resistência à tração, em MPa

P – Carga de ruptura, em N

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm

h – Altura do corpo de prova, em cm.

Figura 3.10- Ensaio de Resistência à Tração na UTM 14



Fonte: Souza (2013)

O Módulo de Resiliência (MR) em conformidade com Souza (2013), é um parâmetro essencial no estudo de misturas asfálticas, pois ilustra a rigidez do revestimento asfáltico. Consoante Brito (2006), o teste do MR foi introduzido por Francis Hveem em 1955, para melhor representar o módulo de elasticidade para materiais sob carregamentos cíclicos. De acordo com a teoria da elasticidade, tanto o MR quanto o módulo de elasticidade possuem a mesma conceituação, sendo ambos representados pela razão entre a tensão e a deformação. A

determinação do MR de misturas asfálticas efetivou-se a partir do ensaio de tração por compressão diametral (tração indireta), em corpos de prova de concreto de cimento Portland. A equação 14, a partir da qual se calcula o MR, é baseada no Modelo de Hondros (1959), cuja formulação fundamenta-se na parcela elástica do deslocamento total de um dado pulso de carga (BRITO e GRAEFF, 2008).

$$MR = \frac{P}{\Delta h} (\nu + 0,2699) \quad (14)$$

Onde:

MR – Módulo de resiliência, em MPa.

P – % da força axial da resistência à tração, em N.

Δ – Deslocamento medido, em mm.

h – Média da altura do corpo de prova, em mm.

ν – Coeficiente de Poisson.

No estudo em pauta realizaram-se os ensaios do MR na *Universal Testing Machine*, UTM 14, (Figura 3.11), nas amostras representativas da composição Referência e alternativas, com a inserção do material polimérico PEAD nas porcentagens iguais a 1 e 2%. Executou-se o experimento por meio do software UTS003 2.00b - *Indirect Tensile Modulus Test*, com parâmetros baseados nos protocolos ASTM D 4123-82 (1995) e AASHTO TP-31-96 (2000), e consoante aos percentuais da resistência à tração (RT) para 10%, 15% e 20%. Para o cálculo do MR considera-se a carga que o CP está submetido por ação do carregamento cíclico e o deslocamento gerado por ele, como representado na Figura 3.11.

Figura 3.11- Ensaio de Módulo de Resiliência na UTM 14



Fonte: Souza (2013)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo apresentam-se os resultados inerentes aos seguintes tópicos: caracterização dos materiais, dosagem das composições asfálticas e caracterização mecânica, por meio dos ensaios de Resistência à Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Ligante Asfáltico

No que tange ao cimento asfáltico de petróleo (CAP), sua análise técnica seguiu as recomendações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), cujos dados constam na Tabela 4.1. Tais resultados, que acompanham o material ao ser adquirido comercialmente na Refinaria Isaac Sabbá (REMAN), exibiram valores dentro das faixas recomendadas pela ANP e o tipificaram como CAP 50/70. Ressalta-se que, o citado ligante betuminoso é comumente utilizado nas obras de pavimentação da cidade de Manaus.

Tabela 4.1- Especificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) (continua)

Características	Unidade	Resultado	Limites	Método
			CAP 50-70	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	69	50 a 70	D5
Ponto de Amolecimento, mínimo	°C	49,7	>46	D36
Viscosidade Saybolt-Furola 135°C	s	283	>141	E102

Tabela 4.2- Especificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) (conclusão)

Características	Unidade	Resultado	Limites	Método
			CAP 50-70	ASTM
Viscosidade Saybolt-Furola 150°C	s	140,7	>50	E102
Viscosidade Saybolt-Furola 177°C	s	50,8	30-150	E102
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21	cP	539	>274	D4402
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP 21	cP	279,8	>112	D4402
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP 21	cP	96,8	57 a 285	D4402
Ponto de Fulgor, mínimo	°C	318	>235	D92
Solubilidade em Tricloroetileno, mínimo	% massa	99,5	>99,5	D2042
Ductilidade a 25° C	cm	100	>60	D113
Solubilidade em Tricloroetileno mínimo	% massa	99,5	99,5	D2042
RTFOT variação em massa	% massa	0,04	<0,5	D2872
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	°C	7,1	<8	D36
RTFOT penetração retida	%	63	>55	D5

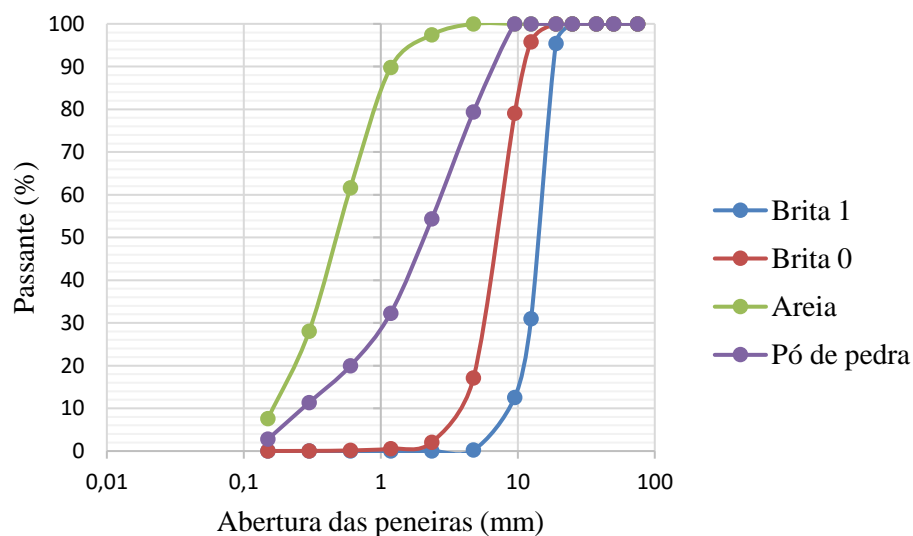
Fonte: Autor (2020)

4.1.2 Agregados

Fizeram parte do estudo duas composições asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA). Formou a mistura asfáltica referência a brita 1, brita 0, areia, e o pó de pedra, integrantes, em regra, dos revestimentos construídos nas vias urbanas manauaras. Na formulação alternativa, além dos citados materiais, integrou também os resíduos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD).

As texturas dos mencionados agregados minerais apresentam-se na Figura 4.1. Salienta-se que a classificação desses materiais é correlacionada ao material passante ou retido nas peneiras utilizadas no ensaio granulométrico. Portanto, em conformidade com o citado experimento tais componentes das misturas asfálticas estudadas foram tipificados, como: brita 1 e brita 0 (agregado graúdo), areia média (agregado miúdo), e pó de pedra (agregado miúdo). Destaca-se que o cimento Portland, passou integralmente pela malha nº 200 (0.075 mm), atendendo, portanto, os requisitos para uso como fíler, conforme ASTM C 117 (*Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*).

Figura 4.1- Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Autor (2020)

Baseado nas curvas granulométricas, também se determinaram o coeficiente de uniformidade (Cu), cujo valor decrescente mostra um material mais graduado; e coeficiente de curvatura (Cc) que determina possíveis descontinuidades. Fundamentado nos dados referentes aos coeficientes supracitados, exibidos na Tabela 4.2, pode-se afirmar que a brita 1, brita 0 e a areia possuem Cu inferior a 5, logo possuem graduação uniforme; e para o pó de pedra com

valor de C_u inferior a 15, evidencia-se uma graduação média. Quanto ao coeficiente de curvatura, todos possuem resultados inferiores a 3, logo, tem-se uma distribuição granulométrica bem graduada.

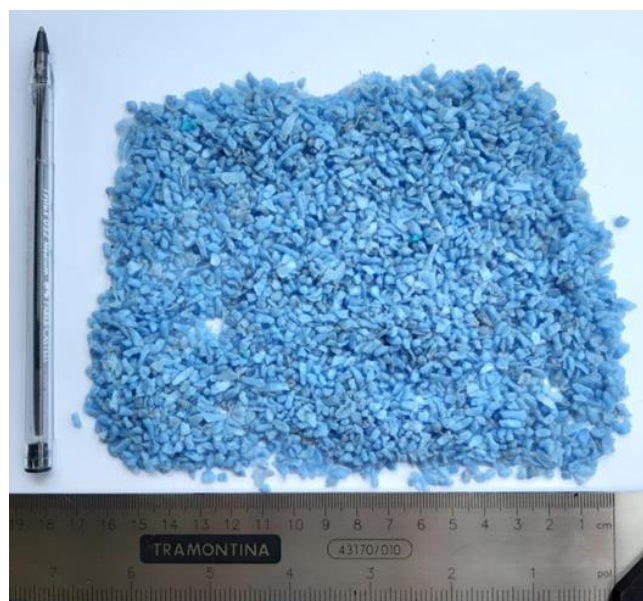
Tabela 4.3- Coeficiente de Uniformidade e de Curvatura dos materiais

Materiais	Coeficiente de Uniformidade (C_u)	Coeficiente de Curvatura (C_c)
Brita 1	1,81	1,16
Brita 0	1,91	0,97
Areia	3,38	1,06
Pó de pedra	11,49	1,58

Fonte: Autor (2020)

Consoante à granulometria dos resíduos do PEAD, buscou-se caracterizá-lo como um agregado alternativo ao pó de pedra. Nesse sentido, realizou-se um processo inicial de moagem, cujo material triturado passou com dificuldade e em poucas proporções na peneira de 4,75 mm, tendo apresentado formato pontiagudo e alongado. A partir dessa etapa, reuniu-se todo o material anterior e novamente pulverizado no segundo moinho com tratamento térmico, resultando um material com aspecto arredondado e menos alongado, que novamente foi passado na peneira de 2,0 mm. Assim, foi possível fazer a substituição parcial do pó de pedra nas porcentagens de 1% e 2% em massa. Na Figura 4.2 tem-se o resíduo de PEAD qualificado como pó de pedra.

Figura 4.2- Resíduos de PEAD triturado passado na # 4,75mm



Fonte: Autor (2020)

Em complemento, na Tabela 4.3, têm-se as densidades dos agregados minerais utilizados nos compósitos convencionais e modificados. Analisando os resultados têm-se que: as massas específicas da brita 1 e brita 0 dos agregados graúdos alcançaram $2,58 \text{ g/cm}^3$ e $2,74 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. A massa específica aparente das amostras brita 1 e brita 0, mostraram resultados semelhantes ($2,55 \text{ g/cm}^3$ e $2,62 \text{ g/cm}^3$), a absorção das britas 1 e 0, evidenciou baixos valores, ou seja, menores que 2%. Enfatiza-se que uma maior absorção dos agregados, resulta em um maior consumo de ligante asfáltico; e o valor de abrasão Los Angeles, referente à brita 1 e brita 0 explicitou um baixo valor da ordem de 14,10 e 27,39 %. Ou seja, estão dentro dos limites (igual ou inferior a 50%) estabelecidos pela norma ASTM C 131. Os grãos da areia residual apresentaram massa específica real de $2,21 \text{ g/cm}^3$. Quanto ao pó de pedra obteve-se um valor igual a $2,75 \text{ g/cm}^3$. A caracterização do cimento Portland resultou em massas específicas reais de $2,94 \text{ g/cm}^3$. Concernente aos resíduos de PEAD, apresenta-se na Tabela 4.4, a título de informação, as principais propriedades de alguns tipos de polietileno similares ao PEAD integrantes das composições asfálticas pesquisadas, obtidas por meio de trabalhos da literatura (ATTAELEMANAN *et al.*, 2010).

Tabela 4.4- Densidade dos agregados

Materiais	Propriedade	Norma	Resultado
Brita 1	Densidade Relativa Real	ASTM C 127	$2,58 \text{ g/cm}^3$
	Densidade Relativa Aparente		$2,55 \text{ g/cm}^3$
	Absorção		0,51%
Brita 0	Densidade Relativa Real	ASTM C 127	$2,74 \text{ g/cm}^3$
	Densidade Relativa Aparente		$2,62 \text{ g/cm}^3$
	Absorção		1,66%
Areia	Densidade Relativa Real	ASTM C 128	$2,21 \text{ g/cm}^3$
Cimento Portland	Densidade Relativa Real	ASTM C 188	$2,94 \text{ g/cm}^3$
Pó de pedra	Densidade Relativa Real	ASTM C 128	$2,75 \text{ g/cm}^3$
Brita 1	Desgaste	ASTM C 131	14,10%
Brita 0			27,39%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 4.5- Propriedades de engenharia do Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

Propriedades	Valor
Densidade, g/cm^3	0,9430
Resistência à tração, Mpa	31,05
Módulo de flexão, GN/m^2	0,307
Ponto de Fusão, °C	149
Alongamento na ruptura, %	>550
Formato	Pelota

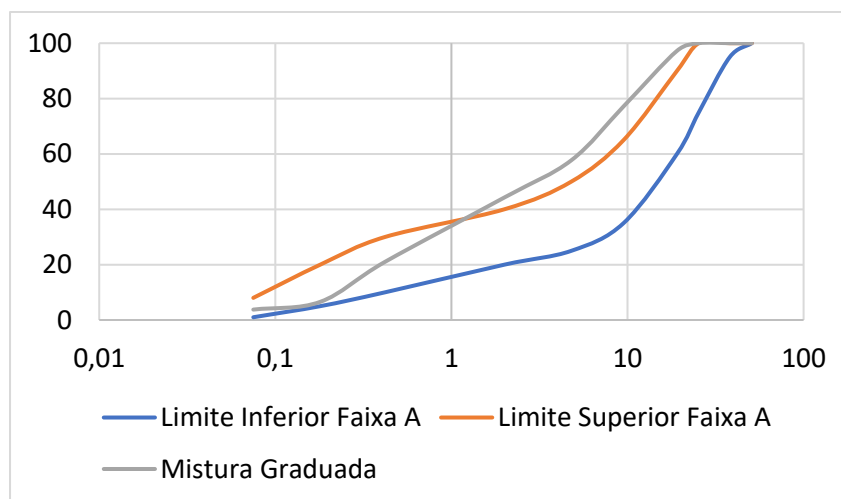
Fonte: Attaelmanan *et al.*, (2010)

4.1.3 Dosagem das Misturas Asfálticas

Para a dosagem dos compósitos asfálticos adotou-se como referencial uma das formulações usadas nos canteiros de obra de pavimentação, pelo corpo de engenharia da Prefeitura Municipal de Manaus (PMM). Na condição de mistura alternativa, além dos materiais presentes na composição referência, adicionaram-se teores de resíduos de Polietileno de Alta densidade (PEAD), reciclado e pulverizado em moinhos de trituração de polímeros, substituindo parte do agregado pó de pedra. Nomearam-se as aludidas misturas asfálticas como: “Referência”, composição convencional do tipo concreto asfáltico empregado na região; PEAD (1%), mistura alternativa com adição de 1% de resíduo do PEAD; e PEAD (2%), composição tendo a presença de 2% de resíduo do PEAD.

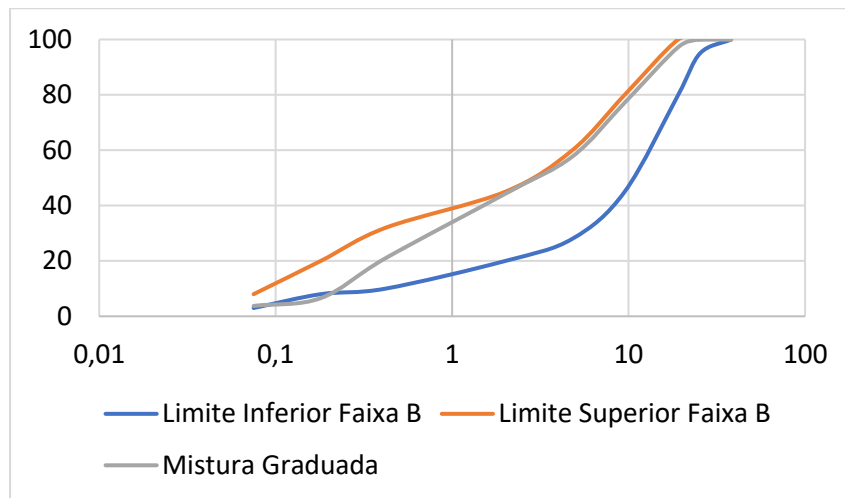
Inicialmente determinou-se pelo método das tentativas para misturas graduadas a dosagem mineral da mistura asfáltica Referência uma das usadas pela Prefeitura Municipal de Manaus. Verificou-se o seu enquadramento consoante a norma do DNIT (031/2006). Observam-se, nas Figuras 4.3 a 4.5, os resultados dessa composição em conformidade com as faixas A, B e C. Em especial, nota-se na Figura 4.5 o enquadramento da mencionada formulação na faixa C destinada a camadas de rolamento.

Figura 4.3- Mistura Referência na Faixa A (DNIT 031/2006)



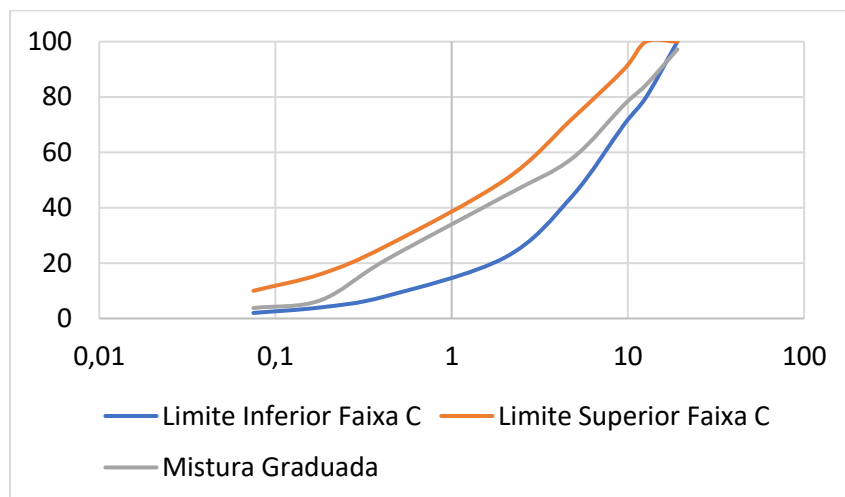
Fonte: Autor (2020)

Figura 4.4- Mistura Referência na Faixa B (DNIT 031/2006)



Fonte: Autor (2020)

Figura 4.5- Mistura Referência na Faixa C (DNIT 031/2006)



Fonte: Autor (2020)

Na sequência, determinou-se, pelo método Marshal, o teor de projeto igual a 5,2% para a Mistura Referência, cujos parâmetros volumétricos constam na Tabela 4.5. Analisando os resultados têm-se que: o Volume de vazios (V_v) e Relação betume/vazio (RBV), mostraram-se dentro dos limites para uma mistura de camada de rolamento, especificados pelo DNIT (031/2006), nos respectivos limites máximos e mínimos de V_v de 3% a 5% e RBV de 75% a 82%, o valor de VAM também atende aos requisitos da supracitada norma.

Tabela 4.6- Parâmetros Volumétricos da Mistura Referência

Volume de vazios	Vv (%)	4,05
Volume de vazios com betume	VCB	11,84
Vazio do agregado mineral	VAM (%)	15,89
Relação betume/vazio (VCB/VAM)	RBV (%)	75

Fonte: Autor (2020)

Fundamentado na formulação referência e seguindo as citadas etapas, dosagem mineral e cálculo do teor de projeto, apresentam-se na Tabela 4.6 os quantitativos finais em termos percentuais dos integrantes das três misturas estudadas. Enfatiza-se novamente que o resíduo do PEAD substituiu em parte o pó de pedra.

Tabela 4.7- Mistura da Prefeitura de Manaus e Misturas com adição do PEAD

Componentes	Dosagem (%)		
	Referência (Prefeitura de Manaus)	PEAD (1%)	PEAD (2%)
Brita 1	14,3	14,3	14,3
Brita 0	28,4	28,4	28,4
Pó de pedra	25,4	24,4	23,4
Cimento	3	3	3
Areia	23,7	23,7	23,7
CAP 50/70	5,2	5,2	5,2
PEAD	-	1	2

Fonte: Autor (2020)

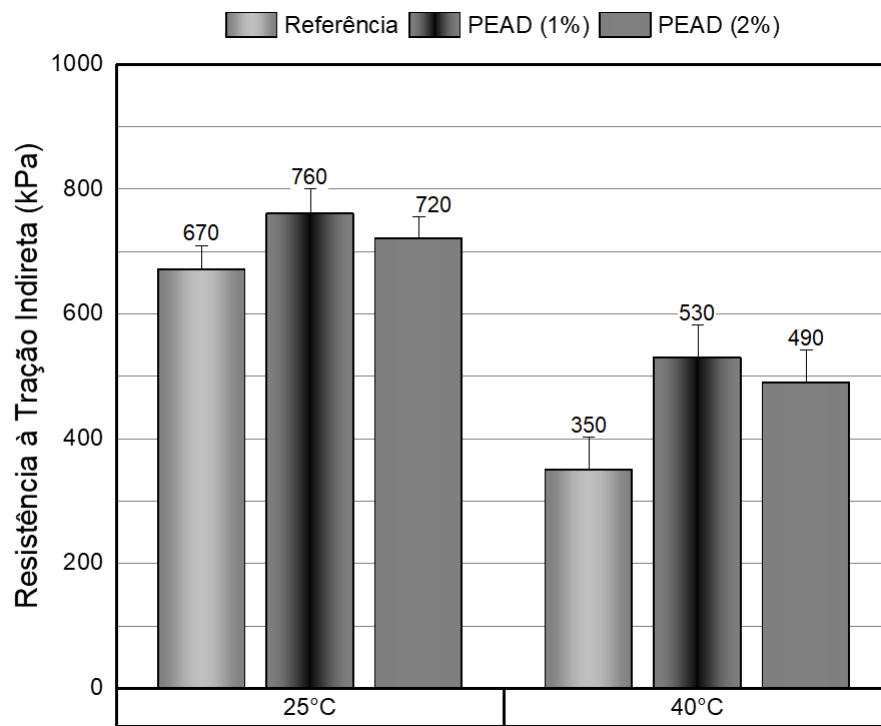
4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

O comportamento mecânico realizou-se segundo os testes de Resistência à Tração por compressão diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR), nas temperaturas de 25°C e 40°C. A escolha dessas temperaturas decorreu das condições prescritas em normas. Enfatiza-se também que, a temperatura de 40°C simula melhor as condições climáticas regionais. Confeccionaram-se, pelo menos, três corpos de prova para cada tipo de composição (referência e alternativas) e temperatura.

4.2.1 Resistência à Tração (RT)

Mediante análise do gráfico exposto na Figura 4.6, nota-se a influência da temperatura nos valores da Resistência à Tração. Observam-se que, as misturas alternativas proporcionaram valores superiores, no tocante à performance mecânica representado pela RT, em comparação à formulação referência. Na temperatura de 25°C obteve-se aumento de resistência na faixa de 7,46% a 13,43%. Na temperatura de 40°C verificam-se acréscimos iguais a 51,43% e 40%. Constataram-se também decréscimos nos valores da RT nas temperaturas de 25°C e 40°C, com o aumento da participação da porcentagem do material polimérico.

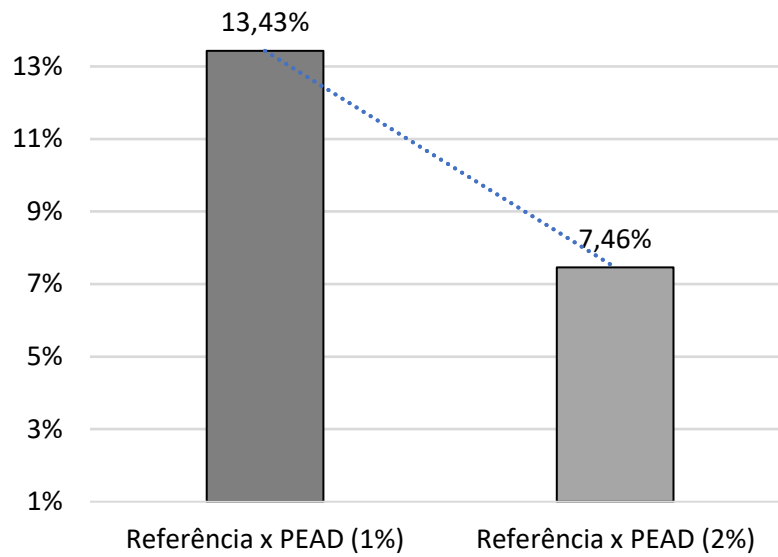
Figura 4.6- Valores da RT para os compósitos



Fonte: Autor (2020)

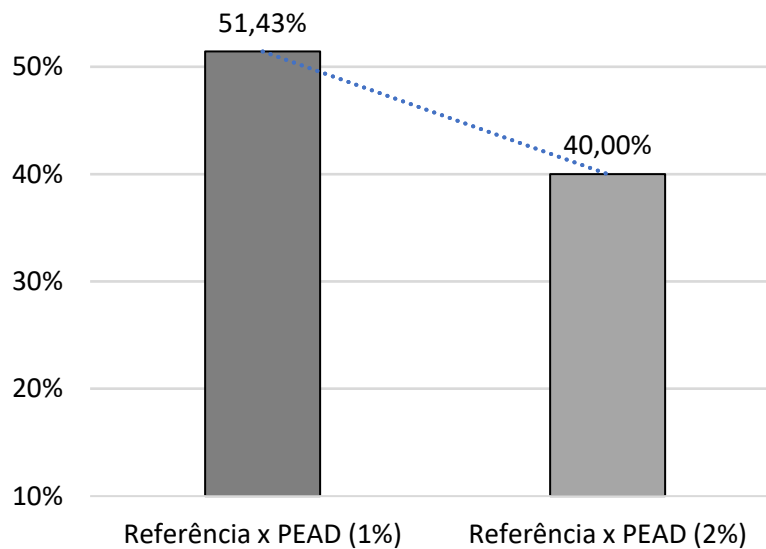
Nas Figuras 4.7 e 4.8 comprova-se que a elevação do teor do PEAD, de 1% para 2%, desencadeou uma perda de desempenho mecânico nas temperaturas estudadas. Específico a Figura 4.7, nota-se que esse valor entre as misturas PEAD (1%) e PEAD (2%), igual a 44,45% na temperatura de 25°C. Na temperatura de 40°C (Figura 4.8) o resultado é menor, chegando a 22,22%, mostrando-se mais satisfatório quando a composição asfáltica é submetida a altas temperaturas.

Figura 4.7- Desempenho da RT para os compósitos a 25°C



Fonte: Autor (2020)

Figura 4.8- Desempenho de RT para os compósitos a 40°C

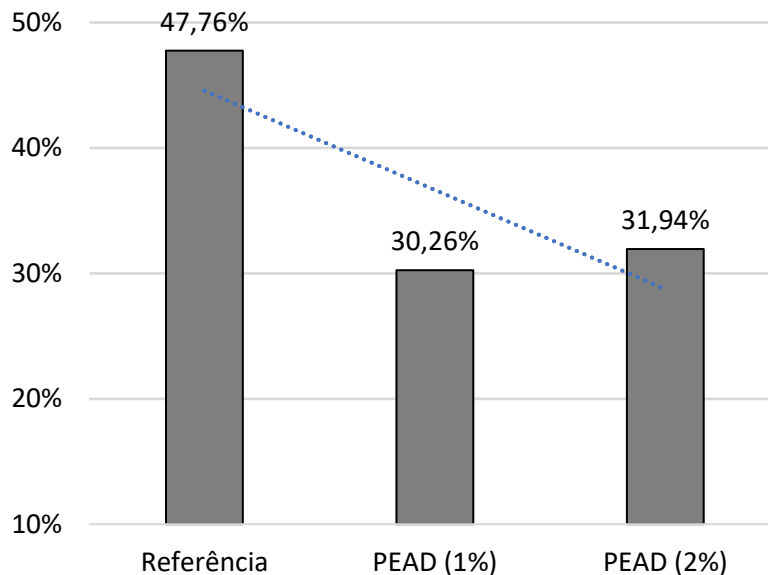


Fonte: Autor (2020)

Examinando a transição da temperatura de 25°C para 40°C, visualizada na Figura 4.9, observa-se que para a Mistura Referência ocorreu um decréscimo de 47,76%. Consoante as composições alternativas registraram-se valores iguais a 30,26% e 31,94%, alusivos as formulações PEAD (1%) e PEAD (2%), respectivamente. Segundos tais resultados a Mistura

PEAD (1%) assinalou a menor perda de resistência com a variação de temperatura.

Figura 4.9- Perda de RT nos compósitos de 25°C a 40°C



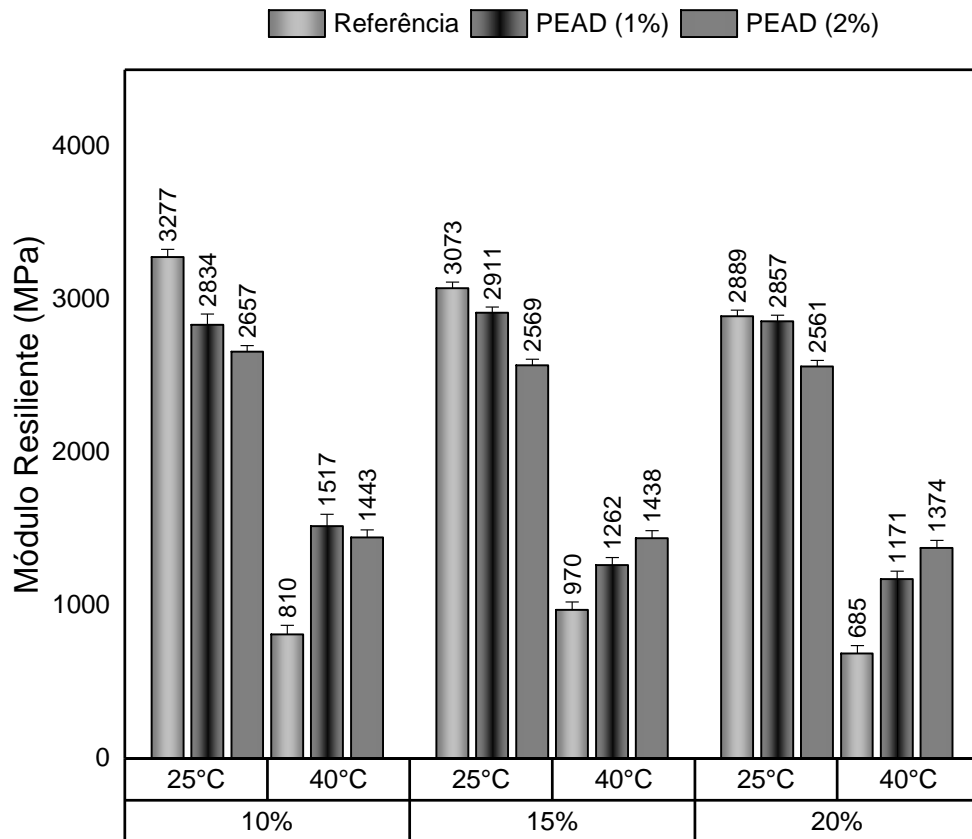
Fonte: Autor (2020)

4.2.2 Módulo de Resiliência (MR)

Adotou-se nos experimentos para determinação do Módulo de Resiliência o coeficiente de *Poisson* igual a 0,35 (KIM, 2009), destinado ao conjunto das temperaturas e composições asfálticas estudadas no trabalho em questão.

A Figura 4.10 mostra o comportamento do módulo de resiliência em função da temperatura e das porcentagens da resistência à tração obtida para às três misturas asfálticas pesquisadas. Analisando-se os gráficos presentes nessa figura, pode-se afirmar que a mistura Referência a 25° C atingiu um decréscimo no desempenho elástico à medida que se elevaram as porcentagens da RT. Contudo, à temperatura de 40°C, houve um aumento do MR, para 15% da RT. Concernente as misturas alternativas, na totalidade das temperaturas, os resultados com a formulação PEAD (1%) evidenciaram maiores valores, com o acréscimo dos valores da porcentagem da RT. Já os compósitos PEAD (2%) mostraram diminuição nos valores do MR, em ambas as temperaturas. Constata-se ainda na figura supracitada, conforme também citado por Guimarães (2019), ínfimas variações nos valores do MR das formulações com o resíduo de PEAD, a 25°C.

Figura 4.10- Valores do MR para os compósitos

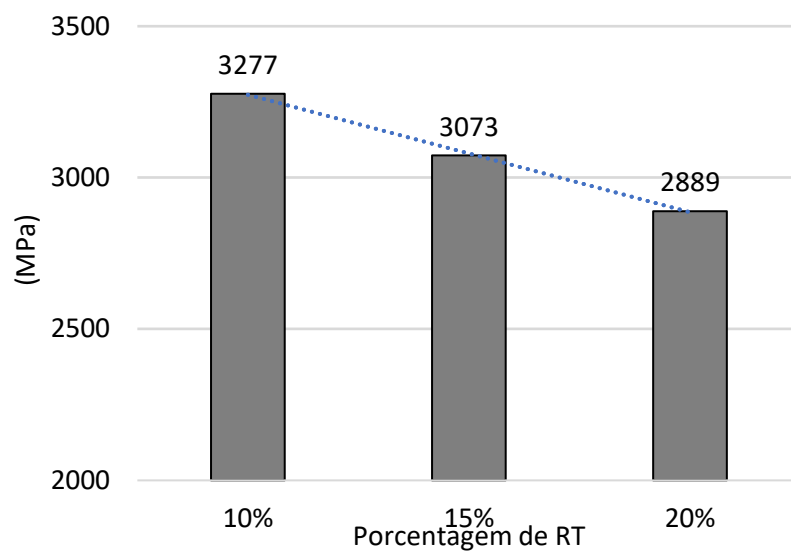


Fonte: Autor (2020)

4.2.2.1 Mistura Referência

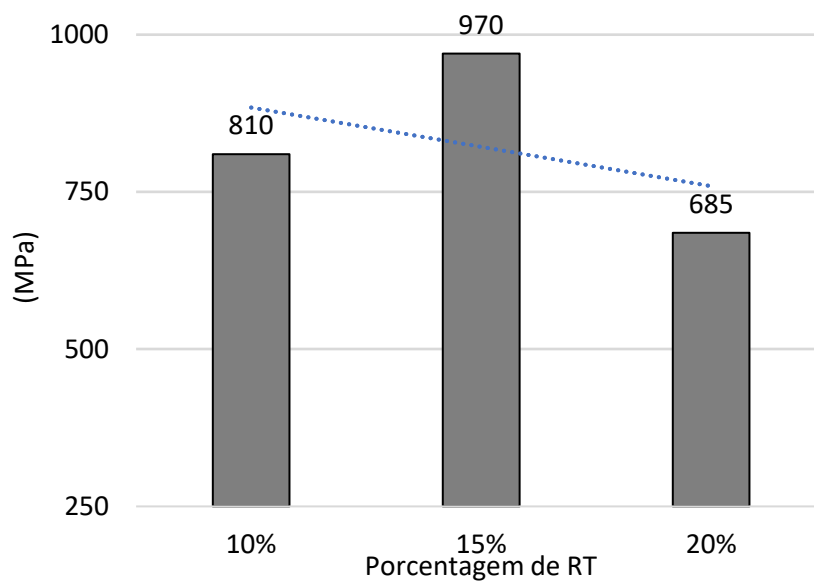
Examinado a Mistura Referência, nota-se na temperatura de 25°C, Figura 4.11, o decréscimo dos valores de MR, à medida que ocorre a variação da porcentagem da RT. Nessa condição tem-se que a supracitada composição perde 6,23% do desempenho resiliente na variação de 10% para 15% da RT. Quando a mudança ocorre de 15% para 20% e 10% a 20% resultam valores de 5,99% e 11,84%, respectivamente. Na temperatura de 40°C, Figura 4.12, a mencionada formulação evidencia ganho de 19,75% para a modificação da porcentagem de 10% para 15% da RT. Porém, ao alterar o percentual de 15% para 20% e de 10% a 20% ocorre uma perda resiliente de 29,38% e 15,43%, na citada ordem. Em complemento, confrontando os valores do Módulo de Resiliência da Mistura Referência a 25°C relativo a 40°C, observa-se uma redução desse parâmetro com o aumento da temperatura, que pode ser visualizada na Tabela 4.7. Assim, evidenciam-se uma redução de elasticidade do compósito asfáltico quando exposto aos esforços da RT, sendo de 75,28% (10%), 68,43% (15%) e 76,29% (20%).

Figura 4.11- Valores de MR para Mistura Referência a 25°C



Fonte: Autor (2020)

Figura 4.12- Valores de MR da Mistura Referência a 40°C



Fonte: Autor (2020)

Tabela 4.8- Influência da Temperatura no MR da Mistura Referência

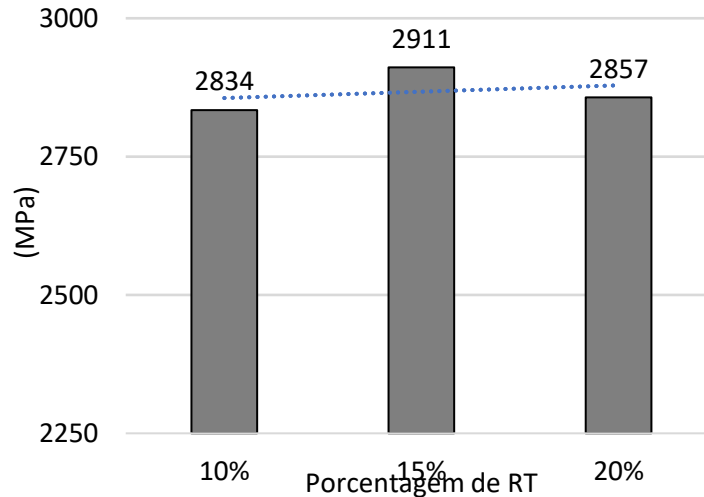
Tipo de composição asfáltica	% da RT	25°C → 40°C
Mistura Referência	10%	75,28%
	15%	68,43%
	20%	76,29%

Fonte: Autor (2020)

4.2.2.2 Misturas Alternativas

Ao que se refere a mistura PEAD (1%) a 25°C, Figura 4.13, expressa, em regra, um acréscimo nos valores de MR, à proporção que se sucede à variação das tensões oriundas da RT. A mencionada composição ganha 2,72% no desempenho resiliente quando da mudança de 10% para 15% e perde 1,86% de 15% para 20%. Porém, retorna a um discreto acréscimo igual a 0,81% de 10% a 20% da RT.

Figura 4.13- Valores do MR da Mistura PEAD (1%) a 25°C

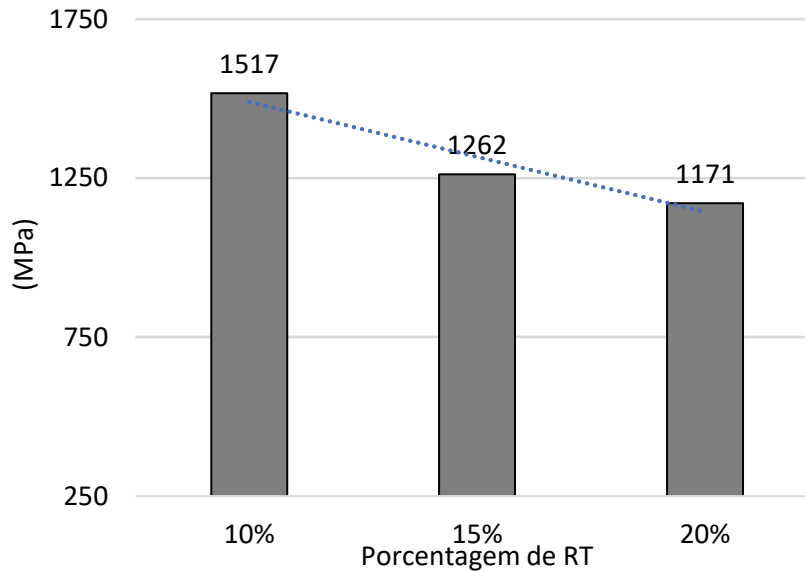


Fonte: Autor (2020)

No caso da formulação PEAD (1%) a 40°C, Figura 4.14, tem-se um decréscimo dos valores do MR, conforme se altera a porcentagem da RT. De tal modo que, a amostra PEAD (1%) registra uma perda de 16,81%, de 10% para 15%, 7,21%, na faixa de 15% para 20%, e 22,80%, no intervalo de 10% a 20%. Concernente o comportamento do MR com o aumento da temperatura, exposto na Tabela 4.8, demonstra menores valores do citado parâmetro a 40°C

relativos aos valores obtidos a 25°C. Assinala-se, portanto, um decréscimo dos resultados na ordem de 10%, 15% e 20% da RT, respectivamente iguais a 46,47%, 56,64%, 59,01%.

Figura 4.14- Valores do MR da Mistura PEAD (1%) a 40°C



Fonte: Autor (2020)

Tabela 4.9 Influência da Temperatura no MR na Mistura PEAD (1%)

Tipo de composição asfáltica	% da RT	25°C → 40°C
Mistura PEAD (1%)	10%	46,47%
	15%	56,64%
	20%	59,01%

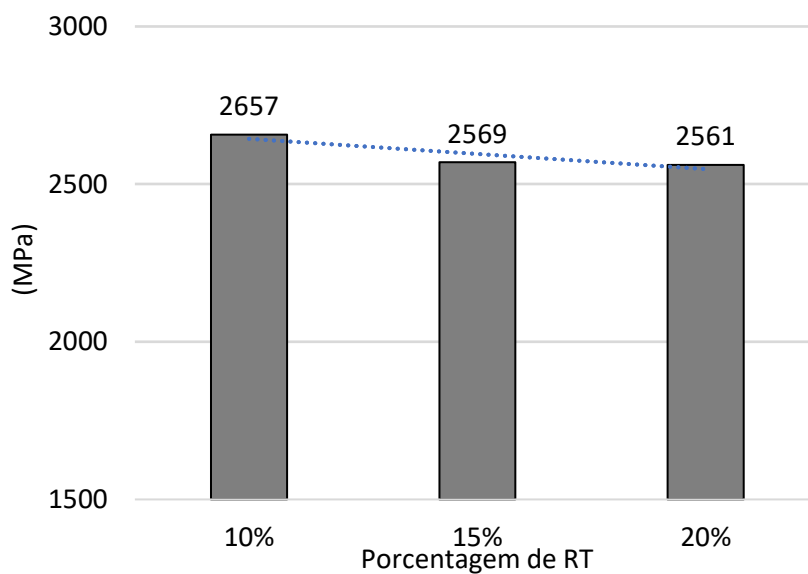
Fonte: Autor (2020)

Na Figura 4.15 apresentam-se os resultados da Mistura PEAD (2%) a 25°C. A mencionada composição asfáltica mostra reduções nos valores de MR de 3,31% na mudança do percentual da RT de 10% para 15%, 0,31 de 15% para 20% e 3,61% na faixa de 10% a 20%.

No caso do comportamento da Mistura PEAD (2%) a 40°C, Figura 4.16, mantém-se um decréscimo dos valores de MR, conforme se dá a mudança do percentual da RT. A amostra PEAD (2%) assinala uma perda de 0,34% na variação de 10% para 15% da RT, igual a 4,45% de 15% para 20% e 4,78% de 10% a 20%. O comportamento do MR concernente a mistura PEAD (2%) a 25°C e 40°C mostram discretas diferenças, podendo ser observado na Figura 4.9

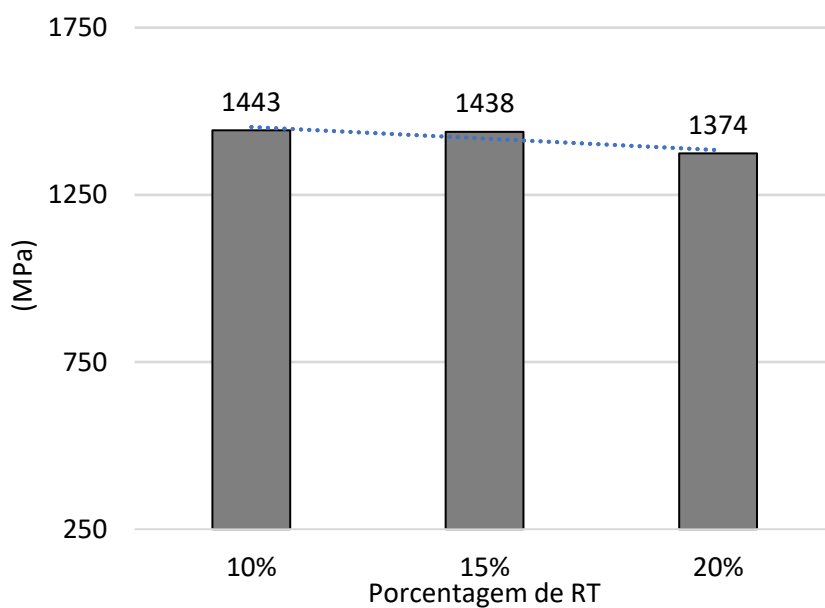
e na Tabela 4.19. Examinando, em particular, os resultados do MR a 40°C respeitantes aos valores a 25°C, nota-se uma perda do desempenho elástico de 45,69% (10%), 44,02% (15%), e 46,34% (20%).

Figura 4.15- Valores do MR da Mistura PEAD (2%) a 25°C



Fonte: Autor (2020)

Figura 4.16- Valores do MR da Mistura PEAD (2%) a 40°C



Fonte: Autor (2020)

Tabela 4.10- Influência da Temperatura no MR da Mistura PEAD (2%)

Tipo de composição asfáltica	% da RT	25°C→ 40°C
Mistura PEAD (2%)	10%	45,69%
	15%	44,02%
	20%	46,34%

Fonte: Autor (2020)

4.2.2.3 Composições pesquisadas e da literatura

As misturas alternativas assinalaram resultados inferiores do MR, na temperatura de 25°C, respeitante à amostra Referência, que obteve valores resilientes quanto a 10%, 15% e 20% da RT, respectivamente, iguais a 3277 MPa, 3073 MPa e 2889 MPa. Notou-se que, a formulação PEAD (1%) expos perdas resilientes quanto a 10% e 20% da RT, respectivamente, iguais a 2834 MPa e 2857 MPa. Todavia, mostrou ganhos nos valores do MR para 15% de RT, de 2911MPa. Específico a composição PEAD (2%), observou-se menores valores do MR, para 15% a 20% da RT, na devida ordem igual a 2569 MPa e 2561 MPa. Em resumo, na temperatura de 25°C, os valores do MR das misturas com material polimérico obtêm comportamento elástico inferior ao da composição Referência.

Concernente as misturas aditivadas com resíduo polimérico, a temperatura de 40°C, os resultados apontaram, em geral, valores do MR superiores à amostra Referência. Confrontando em particular a 10% da RT, a composição PEAD (1%) mostrou valor do MR de 1517 MPa, superior em relação a 1443 MPa (PEAD com 2%) e 810 MPa (Referência). Entretanto, para a variação de esforços de 15% e 20% da RT, a composição PEAD (1%), com valores de MR, respectivamente, iguais a 1262 MPa e 1171 MPa, registram resultados inferiores atinente ao da formulação PEAD (2%), com resultados iguais a 1438 MPa e 1374 MPa. Mas, manteve desempenho elástico superior referente a amostra de Referência, com os valores de MR, iguais a 970 MPa e 685 MPa, para aos respectivos esforços 10% e 15%. É importante salientar que, a temperatura mais alta, de 40° C, proporcionou maiores valores do MR das amostras alternativas, respeitante à amostra Referência. Assim sendo, nessa temperatura, as formulações alternativas, PEAD (1%) e PEAD (2%), obtiveram os melhores desempenhos elásticos.

Nos estudos realizados por Rahman *et al.* (2014), centrado no comportamento do módulo de resiliência de misturas asfálticas, foi incluído no Concreto Asfáltico o polietileno

tereftalato (PET) e Polietileno de Alta Densidade (PEAD), substituindo o agregado miúdo segundo as porcentagens de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Mencionam que todas as formulações modificadas com PEAD mostraram-se mais rígidas relativas aqueles não modificados, exceto para o compósito com 25% do PEAD. Citam ainda que, após a porcentagem de 20% da participação do material polimérico não se demonstram melhoras no desempenho resiliente. Em resumo, concluem que a rigidez das misturas modificadas com PEAD apresentaram-se maiores atinentes as formulações com PET.

Attaelmanan (*et al.*, 2001) estudaram misturas asfálticas a quente sem e com a presença de 5% do PEAD. Os valores do MR resultaram iguais a 1515 MPa (referência) e 2410 MPa (alternativa) para temperaturas a 25°C. Mencionaram ainda que o quantitativo aditivado do PEAD causou um aumento nos valores do MR em altas temperaturas, indicando um pavimento com alto desempenho, durável e econômico.

No trabalho voltado para misturas asfálticas com PEAD, Attaelmanan *et al.* (2010) avaliaram a modificação do CAP convencional pela inclusão do PEAD nos teores de 1%, 3%, 5% e 7%. Tais compósitos apontaram comportamento mecânico superior comparado às formulações com o CAP não modificado. Citam que, o adicional de 5% de PEAD ao ligante betuminoso produziu melhor desempenho e durabilidade.

4.3 RELAÇÃO MR/RT

Santos *et al.* (2015) citam que a relação MR/RT mostra que “um menor valor pode levar a um melhor comportamento quanto à elasticidade e à resistência à tração das composições asfálticas”.

Relativo às composições pesquisadas, constam na Tabela 4.10 a média dos valores do MR e RT, que propiciaram a determinação da relação MR/RT. Tais resultados assinalam que, as amostras alternativas a 25°C possuem os menores valores da citada razão, respeitante à formulação Referência. Enfatiza-se, igualmente, que a composição PEAD (2%) evidenciou o menor resultado. Portanto, representa o melhor desempenho quanto a rigidez e deformação.

Tabela 4.11- Relação MR/RT para as Misturas asfálticas a 25°C

Parâmetro	Mistura Referência	Mistura PEAD (1%)	Mistura PEAD (2%)
MR (MPa)	3080	2867	2596
RT (MPa)	0,670	0,760	0,720
MR/RT	4597	3772	3605

Fonte: Autor (2020)

Na temperatura de 40°C (Tabela 4.11), verifica-se que a amostra Referência apresenta menor valor da relação MR/RT indicativo as composições alternativas. Também é possível destacar que, os resultados obtidos pelas misturas asfálticas PEAD (1%) e PEAD (2%) mostraram valores inferiores da razão MR/RT, atinentes aos determinados para as formulações com resíduos poliméricos e a composição Referência, a 25°C. Deste modo, comprovam o melhor desempenho em altas temperaturas, quanto a elasticidade e deformação, segundo Santos *et al.* (2015).

Tabela 4.12- Relação MR/RT para as Misturas asfálticas a 40°C

Parâmetro	Referência	PEAD (1%)	PEAD (2%)
MR (MPa)	822	1316	1418
RT (MPa)	0,350	0,530	0,490
MR/RT	2349	2483	2894

Fonte: Autor (2020)

Na pesquisa realizada por Costa, Albuquerque e Mendonça. (2015), abalizado na análise de uma camada binder de CA, a relação MR/RT resultou igual a 4583. Por conseguinte, enfatiza-se que são valores substancialmente maiores aqueles encontrados para o conjunto das formulações aditivadas com resíduos poliméricos e estudadas no trabalho em questão.

5 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principal objetivo avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas modificadas pela adição de um agregado alternativo, nos teores de 1% e 2% em substituição ao agregado miúdo pó de pedra, obtido a partir de um resíduo de Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Tal material origina-se do descarte pós-consumo, da instalação de tubos de PEAD, aplicados em diversos ramais prediais da cidade de Manaus. A mistura asfáltica Referência, do tipo Concreto Asfáltico (CA), seguiu uma dosagem costumeiramente aplicada em serviços de pavimentação da Prefeitura Municipal de Manaus (PMM).

Concernente as conclusões alcançadas nesta pesquisa, têm-se:

A Mistura Referência se enquadrou dentro dos limites da faixa C para dosagem de composições asfálticas de uma camada de rolamento. Na confecção dos resíduos de PEAD foram necessários dois (2) processos de moagem com tratamento térmico, para se obter um material característico de um agregado miúdo.

Alusivo aos resultados mecânicos, as formulações alternativas atingiram, respeitante à Mistura Referência, aumentos da RT em todas as temperaturas pesquisadas. Específico aos compósitos com PEAD, o desempenho mecânico apresentou valores decrescentes com o aumento dos resíduos poliméricos. Concernente aos valores do MR, a Mistura Referência e na temperatura de 25°C apontou o maior valor alusivo as composições aditivadas. Resultado oposto quando se determinou o MR na temperatura de 40°C.

Os valores da relação MR/RT para as composições com resíduos poliméricos foram inferiores ao resultado para a mistura Referência a 25°C, e discretamente superiores na temperatura igual a 40°C. Os resultados da citada razão das amostras alternativas mostraram os menores valores, em altas temperaturas. Consequentemente, melhor comportamento quanto à elasticidade e à resistência à tração, conforme cita Santos *et al.* (2015).

Pelo exposto, pode-se concluir que o emprego de resíduos de PEAD como agregado miúdo revelaram satisfatórios resultados, consoante aos aspectos técnicos e ambientais para serviços de pavimentação.

Sugere-se para a continuação do trabalho em questão: emprego dos resíduos do PEAD em outras granulometrias e teores, realizar o estudo segundo distintas dosagens empregadas em serviços de pavimentação da cidade de Manaus, e determinar o comportamento mecânico em conformidade com o módulo dinâmico e o *creep*, estático e dinâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO – TP-31-96**: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension, American Association of State Highway and Transportation Officials, Estados Unidos, 2000.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018-2019. 2019. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 20 ago. 2020.

ANP- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº19/2015, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15561**: Tubulação de polietileno PE 80 e PE 100 para transporte de água e esgoto sob pressão – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS. **ABPE**: Manual de boas práticas: Módulo 1 – Designação e Dimensões de Tubos Poliolefinicos, 2013. Disponível em: http://abpebrasil.com.br/cartilha/1_2.pdf . Acesso em: 24 jun. 2019.

RAO, M.; Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (PET) triturado. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-128**: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of fine Aggregate, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-4123**: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, USA, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1248**: Standard Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials for Wire and Cable, USA, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM – C127**: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, USA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 117**: Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. USA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 127**: Standard test

method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. USA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 128**: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. USA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 131**: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. USA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 188**: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. USA, 2017. 80

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5**: Standard test method for penetration of bituminous materials. USA. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 36**: Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus). USA. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4402**: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. USA. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 92**: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. USA, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 113**: Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials. USA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2041**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. USA, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2042**: Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene. USA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2726**: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures. USA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). USA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4867**: Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. USA, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6926**: Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus1. USA,

2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4976**: Standard Specification for Polyethylene Plastics Molding and Extrusion Materials, USA, 2012

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3350**: Standard Specification for Polyethylene Plastic Pipe and Fittings Materials, USA, 2014

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 102**: Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures. USA, 2016

ANJOS, L. Z.; Reciclagem de materiais poliméricos para pavimentação. 2019, Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, UNISUL, Tubarão, Santa Catarina, 2019

ATTAELMANAN, M.; **FENG, C. P.**; **AI, A.-H.**; Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 2010. Disponível em: 25(5), 2764–2770. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037, Acesso em: 20 ago. de 2020.

BARROS, L. M.; Deformação Permanente de Misturas Asfálticas: Avaliação do Desempenho Conforme Critério de Flow Number de Misturas Quentes e Mornas. 2017. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Reciclagem. Brasília, DF. Disponível em : <https://www.mma.gov.br/informma/item/7656-reciclagem#>:. Acesso em: 20 ago. 2020.

BRITO, L. A. T.; Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRITO, L. A. T.; **GRAEFF, Â. G.**; Avaliação da metodologia de cálculo para determinação do módulo de resiliência por compressão diametral para fins de projeto de pavimento e controle de qualidade de obras. Relatório final de pesquisa - Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre – CONCEPA, 2008.

CABRAL, A. M.; Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Agregado Sinterizado de Argila Modificadas por Nanomaterial de Multicamadas de Grafeno. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus

CANDIAN, L. M.; Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso de elementos estruturais. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

CANEVAROLO, S. V. JR.; Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros, 3. ed. revisada e ampliada, 2010

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L.; Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. *Acta Scientiarum*, v. 24, n. 6, p. 1599-1602, 2002.

CARLESSO, G. C. Estudo do Comportamento de Mistura Asfáltica Modificada por Nanoargila e Polímero SBS. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

CHANDRAWAL, M.; VERMA, G.; KUSHWAH, K.; SHARMA, V. K.; An Experimental Study of Rutting on Dense Bituminous Macadam of Grading-I (Middle) using Crumb Rubber Modified Bitumen and Waste Plastic Coated Aggregates. Shri Govindram Seksaria Institute of Technology and Science, Indore, Madhya Pradesh. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI)*, Volume. III, Issue XII, December 2016.

CHOI, Y. T and KIM, Y. R. “Development of characterisation models for incremental permanent deformation model for asphalt concrete in confined compression”. *Road Materials. Pavement Des.*, vol14, pp 266–288, 2013.

CHOUDHARY, J.; KUMAR, B.; GUPTA, A.; “Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 234. Elsevier Ltd, p. 117271, 20 Feb 2020.

COSTA, H. M. D., RAMOS, V. D., ANDRADE, M. C. D., NUNES, P. D. S. R. Q. Análise térmica e propriedades mecânicas de resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD), Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Universidade Estácio de Sá – UNESA Nova Friburgo, RJ, Brasil, *Polímeros*, 26(número especial), 75-81, 2016

COSTA, L.; FERNANDES, S.; SILVA, H. M. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M.; Valorização de Resíduos Plásticos na Modificação de Betumes para Pavimentos Rodoviário. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, 2013.

COSTA, G. M.; ALBUQUERQUE, F. S.; MENDONÇA, A. T.; Análise Comparativa entre Resultados de Módulo de Resiliência Obtidos por Retroanálise de Bacias Deflectométricas de FWD e por Ensaio de Laboratório. 44ª Reunião Anual de Pavimentação, 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 4º ExpoPavimentação, Foz do Iguaçu, Paraná, 18 a 21 ago. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. CNT: Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas 2019, 4. ed., Brasília Distrito Federal. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/>. Acesso em 01 set 2020.

COURA, I. R. Avaliação do Processamento de Compósitos Baseados em Polietileno de Alta Densidade e Rejeito de Mineração de Ferro. 2018. Dissertação (Mestrado Multicêntrico em Química). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C.; de; Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações. Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 13, n. 1, p. 1-13, 2003.

DAS, B.M. Fundamentos de engenharia geotécnica. Cengage Learning, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006-ES:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095/2006-EM:** Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2018-ME:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio . Rio de Janeiro, 2018.

FUNDO MUNDIAL PARA A NATUREZA. **WWF.** Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico; 04 mar 2019; Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>; Acesso em: 01 set 2020.

GENNESSEAU, M. M. L; Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

GUIMARÃES, M. E.; Efeito da Adição de Resíduos de Polietileno de Alta Densidade e Borracha de Pneus em Ligante Asfáltico 50/70. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Latino Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT). Foz do Iguacú, Paraná.

HAMEDI, G. H. SHAMAMI, K. G. PAKENARI, M. M. Effect of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the performance characteristics of hot mix asphalt. Department of Civil Engineering, University of Guilan, P.O. Box 3756, Rasht, Iran. Construction and Building Materials, 2020

HINISLIOĞLU, S. AGAR, E.; Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. Materials Letters 58 (2004) 267 – 271. Received 31 March 2003; accepted 28 May 2003. Disponível em: www.elsevier.com/locate/matlet

INSTITUTO DE ENGENHARIA. Estudantes gaúchas criam o Poliway, um inovador asfalto ecológico, Publicado em: 19/07/2016, Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2016/07/19/estudantes-gauchas-criam-o-poliway-um-inovador-asfalto-ecologico/>. Acesso em: 01 set. 2020.

JANSON, L.E.; Plastic pipes for water supply and sewage disposal. Stockholm: VBB/SWECO INTERNATIONAL, 2003, 404p.

KANAFLEX S/A INDUSTRIA DE PLÁSTICOS. **KANALISO:** Manual Técnico Tubo de Parede Lisa de Polietileno (PE). Cotia – SP, 3. ed., junho/2016

KHURSHID, M. B.; QURESHI, N. A. ; MUHAMMAD, ·A. H.; IQBAL, ·M. J.; Enhancement of Hot Mix Asphalt (HMA) Properties Using Waste Polymers. Arabian Journal for Science and

Engineering. v.44, p. 8239–8248, 2019.

KIM, Y. R.; Modeling of Asphalt Concrete. New York: McGraw-Hill Education, 2008.

LJUNGBERG, L.Y.; Materials selection and design for structural polymers. Materials and desing, Vol. 24, n°5, pp. 383-390, 2003.

MANOEL, G. F.; Caracterização Físico-Química e Estudo Reológico de Asfaltos Modificados Pelos Polímeros PEAD, PEBD e PELBD e Contribuição ao Estudo do Envelhecimento do Cimento. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química Asfáltica de Petróleo. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

MARCONDES, R. A. C; Estudo do uso das tubulações de PEAD em sistemas de distribuição de água no Brasil. São Paulo, 2016, Dissertação (mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

MERIGHI, C. F.; **SUZUKI, C. Y.;** Estudo do comportamento do revestimento de pavimento utilizando mistura asfáltica morna com adição de borracha moída de pneu na SPA-248/055. Transportes. v. 25 n. 4, 2017

MGS INDUSTRIA E COMÉRCIO. MGS Plásticos: Tubo de Polietileno (PEAD). Disponível em:<https://mgsplasticos.com.br/tubo-de-polietileno-pead/>. Acesso em: 01 set. 2020.

NTS- NORMA TÉCNICA SABESP. NTS 048: Tubo de Polietileno para ramais prediais de água. São Paulo, 2019.

OSSA, A.; **GARCIA, J. L.;** **BOTERO, E.;** Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. J. Clean. Prod. 135, 379–386, 2016.

PAREJA, J. A. M.; **ARAÚJO, J. H. B.;** **FRANCO, J. M.;** **BOLZANI, H. R.;** **GONÇALVES, D. M.;** **SOUZA, S. R.;** Utilização de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) como Agregado em Substituição a Areia na produção de Concreto. Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 27 e 28 ago. 2009, Maringá, Paraná.

PERES, F. M. Desenvolvimento de métodos alternativos para a avaliação da resistência à fratura por fluência de resinas de polietileno utilizadas para a extrusão de tubos de água, 2005, Dissertação (mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

PLASTICROAD. Infraestrutura Sustentável para todos, em qualquer lugar. Disponível em: <https://www.plasticroad.eu/en/>. Acesso em: 20 ago. 2020.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MANAUS. PMM; Casa Civil; Mensagem nº024/2018. Disponível em: http://www.cmm.am.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/PL_135_2018_Msg_024.pdf. Acesso em: 01 set. 2020

POLIERG. Produtos – Saneamento – Tubos de PEAD. Disponível em:<http://www.polierg.com.br/tubos_em_pead.asp>. Acesso em: 20 de junho, 2019.

RAHMAN, W. M. N. W. A.; WAHAB, A. F. A.; ZULKIFLY, S. N.; Behaviour of Asphalt Mixtures with Recycled Polyethylene Terephthalate and High Density Polyethylene Pellet as Fine Aggregate Replacement, 8 th MUCET 2014, Date: 10-11 November 2014, Melaka, Malaysia

RAMOS, J. C.; Polímeros quirais: Polipirróis e politiofenos modificados com R-(-) ou S-(+)-N-(3,5-Dinitrobenzoi)- α -fenilglicina. 2007, Tese (Doutorado em Química), Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco

RAZAK, N. B. A.; Utilization of Waste High Density Polyethyelen (HDPE) as a Course Aggregate Replacement With Fly Ash As Filler on Hot Mix Asphalt, Thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the B. Eng (Hons.) Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources January, 2015,

REDDY, N. M.; **VENKATASUBBAIAH, M. C.** Effects of high density polyethylene and crumb rubber powder on properties of asphalt mix. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 04 Issue: 06, June -2017

SANTOS, K. P.; **LUCENA, A. E. F. L.;** **LUCENA, L. C. F. L.;** **SILVA, J. A. A.;** **COSTA, S. C. F. E.;** Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas em cimentos asfálticos de petróleo. Rev. Mater. 20, 501–513, 2015

SHAW, P. S. Stress-strain relationships for granular materials under repeated loading [Ph.D. thesis], Department of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK, 1980.

SILVA H. M. R. D.; **PERALTA J.;** **COSTA L.;** **FERNANDES S.;** **OLIVEIRA J. R. M.;** **PEREIRA P. A. A.** Desenvolvimento e estudo de ligantes modificados inovadores para infraestruturas de transporte, 7 ° Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 978-989-98832-0-8, 2014.

SILVA, M. P. S.; Avaliação Mecânica de Misturas Asfálticas Usuais em Revestimentos Regionais. 2017, Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus

SOUZA, R. J. Q.; Validação Tecnológica do Caroço do Fruto do Açaí como Material Alternativo na Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus

TAVARES, D. S.; Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico. 2012, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

THOMAS, E. C. S.; Ensaio de compressão diametral, julho 2019, 12f. Notas de Aula. Disponível em: http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/compresso_diametral.pdf. Acesso em: 20 jun. 2019.

TORRES, A. P. Compósitos com biochar e carvão vegetal para camadas de pavimentos

asfálticos. 2018, Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus

TUBOS PEAD MG: Tubos e Conexões. Manual Técnico do Polietileno. Belo Horizonte, Minas Gerais. Disponível em: <https://tubospeadmg.com.br/images/demo/catalogos/manual-tubos-pead.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

VALENÇA, P. M. A.; Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas do Tipo Stone Matrix Asphalt com Uso de Fibras Amazônicas e Agregados de Resíduos de Construção e Demolição. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus