



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

AMANDA JÉSSICA RODRIGUES DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE
(PEAD) PARA COLORAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

CAMPINA GRANDE-PB

2022

AMANDA JÉSSICA RODRIGUES DA SILVA

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE
(PEAD) PARA COLORAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

CAMPINA GRANDE-PB

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

S586u Silva, Amanda Jéssica Rodrigues da.
Utilização de resíduos de polietileno de alta densidade (PEAD) para coloração de misturas asfálticas / Amanda Jéssica Rodrigues da Silva. – Campina Grande, 2022.
120 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena".

Referências.

1. Revestimentos Asfálticos Coloridos. 2. Ilha de Calor Urbana. 3. Refletância Solar. 4. Ligantes Modificados. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 625.8(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

AUTORA: AMANDA JÉSSICA RODRIGUES DA SILVA

TÍTULO: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD) PARA COLORAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

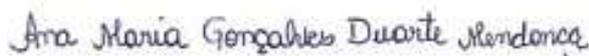
Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração – Geotécnica
Dissertação defendida e aprovada em 03 de Março de 2022.

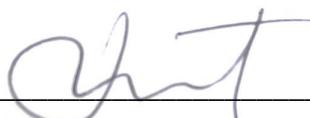
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena (Orientador)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Profa. Dsc. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça (Avaliador Interno)
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG



Dsc. Fabiano Pereira Cavalcante (Avaliador Externo)
JBR Engenharia Ltda



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
 POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
 Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): AMANDA JÉSSICA RODRIGUES DA SILVA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR.^a ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA – IFPB – EXAMINADORA INTERNA, DR. FABIANO PEREIRA CAVALCANTE - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 06/2022). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD) PARA COLORAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 14:30 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 03 DE MARÇO DE 2022**

5. **FABIANO PEREIRA**

6. **CAVALCANTE:91039266487**

Assinado de forma digital por FABIANO PEREIRA CAVALCANTE:91039266487
 Dados: 2022.03.07 08:54:25 -03'00'

7. **FABIANO PEREIRA CAVALCANTE - EXAMINADOR EXTERNO**



Documento assinado eletronicamente por **Amanda Jessica Rodrigues da Silva, Usuário Externo**, em 03/03/2022, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA, Usuário Externo**, em 03/03/2022, às 18:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, CHEFE (A)**, em 04/03/2022, às 10:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 04/03/2022, às 12:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2124425** e o código CRC **1EE707F8**.

Dedico este trabalho a Gerlândia Rodrigues e Nicolly Sthefane, em especial, pelo apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a amada mãe Maria, por sua presença em todos os momentos, me dando forças para seguir de cabeça erguida.

Ao Professor Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, pela forma que me orientou no progresso deste trabalho.

A Universidade Federal de Campina Grande, ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental pela oportunidade, bem como a CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

Ao Professor Tomás e a professora Edcleide de Materiais, pela disponibilidade do uso de equipamentos e pela atenção, assim como ao técnico Emanuel.

A Daniel pela boa vontade e contribuição neste trabalho.

A Jadilson pela ajuda na execução da parte experimental desta pesquisa e pela boa convivência, assim como Arthur pela prestatividade na execução de ensaios e nas análises reológicas.

A Joseildo e Ladjane pelo carinho e companhia diária.

Aos amigos que a UFCG me permitiu conhecer e levar para a vida, em especial, Osires de Medeiros.

A professora Ana Maria Gonçalves e ao Dr. Fabiano Pereira Cavalcante da JBR Engenharia Ltda, pelas palavras de carinho e contribuições no final deste trabalho.

A todos aqueles que torceram pelo meu sucesso e deram a sua contribuição para que este trabalho fosse realizado.

A esses deixo aqui os meus mais sinceros agradecimentos.

*Que darei eu ao Senhor, por todos os
benefícios que me tem feito?*

(Salmos 116:12)

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente tem se evidenciado cada vez mais nos últimos anos, sabendo que um dos principais problemas ambientais encontrados em centros urbanos está associado ao fenômeno de ilha de calor urbana, que apresenta como um dos grandes vilões os pavimentos asfálticos justamente por ocuparem uma elevada área superficial nas cidades e possuírem coloração escura. Em vista dessa problemática ambiental, uma maneira de obter superfícies pavimentadas mais frias sob a incidência de radiação solar é aumentando o albedo das mesmas, por meio da coloração de superfícies asfaltadas, para isso, sugere-se, o uso de materiais que absorvem menos calor, nesse caso, a utilização de superfícies mais claras, obtidas por meio da coloração dos pavimentos asfálticos, com cores mais claras, que sejam capazes de refletir de fato a luz solar. Assim o objetivo deste trabalho é investigar o potencial da utilização de resíduos de PEAD para coloração de misturas asfálticas, com vista a minimização do fenômeno de ICU, pela alta refletância das cores do PEAD, além de verificar o comportamento reológico e mecânico de misturas asfálticas modificadas com esses resíduos. Com vista a atender esse objetivo, a pesquisa foi estruturada em duas vertentes principais: primeiro, caracterização mecânica das misturas asfálticas com a incorporação do PEAD, e segundo, verificar o uso de PEAD na camada de revestimento e sua contribuição na redução da temperatura da superfície e aumento a refletividade em relação aos pavimentos convencionais de cor escura. Os resultados mecânicos indicaram a viabilidade técnica da incorporação do PEAD a mistura, comparando os resultados obtidos para as misturas convencionais, a modificada se destacou em 7,14% quanto a resistência a tração, 18,1% quanto a resiliência, 14% no comportamento deletério da água e 129% em deformação permanente. Quanto ao uso do PEAD para coloração, esse mostrou-se satisfatório, os ensaios de refletância solar mostraram que as misturas asfálticas coloridas se destacaram frente às misturas asfálticas sem o granulado de PEAD. Os ensaios de temperatura em campo mostraram que as misturas asfálticas coloridas atingem temperaturas até 3,5 °C menores do que as misturas sem PEAD, evidenciando assim a possibilidade do uso de PEAD nas superfícies de misturas asfálticas como agente colaborador para redução da ICU.

Palavras-Chave: Revestimentos asfálticos coloridos, Ilha de calor urbana, Refletância Solar, Ligantes modificados.

ABSTRACT

Concern for the environment has become increasingly evident in recent years, knowing that one of the main environmental problems found in urban centers is associated with the phenomenon of urban heat island, which presents asphalt pavements as one of the great villains precisely because they occupy a high surface area in urban centers and have a dark color. In view of this environmental problem, one way to keep paved surfaces cooler under the incidence of solar radiation is to increase their albedo, through the coloring of paved surfaces, for this, it is suggested, the use of materials that absorb less heat, in this case, the use of lighter surfaces, achieved with the coloring of asphalt pavements, which are capable of actually reflecting sunlight. Thus, the objective of this work is to investigate the potential of using HDPE residues to color asphalt mixtures, with a view to minimizing the UHI phenomenon, due to the high reflectance of HDPE colors, in addition to verifying the rheological and mechanical behavior of modified asphalt mixtures. with these residues. To meet these objectives, this research was structured in two main aspects: first, mechanical characterization of the asphalt mixtures with the incorporation of HDPE, and second, to verify the use of HDPE in the coating layer and its contribution in the reduction of surface temperature and increase reflectivity compared to conventional dark-colored floors. The mechanical results indicated the technical feasibility of incorporating HDPE into the mixture, comparing the results obtained for the conventional mixtures, the modified one stood out in 7,14% in terms of tensile strength, 18.1% in terms of resilience, 14% in the deleterious behavior of the water and 129% in permanent deformation. As for the use of HDPE for coloring, this proved to be satisfactory, the solar reflectance tests showed that the colored asphalt mixtures stood out against the asphalt mixtures without HDPE granulate. The temperature tests in the field showed that the colored asphalt mixtures reach temperatures up to 3.5 °C lower than the mixtures without HDPE, thus showing the possibility of using HDPE on the surfaces of asphalt mixtures as a collaborating agent to reduce the UHI.

Keywords: Colored Asphalt Coatings, Urban Heat Island, Solar Reflectance, Modified Binders.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Propriedades dos ligantes asfálticos melhoradas com a adição de resíduos modificadores poliméricos.	24
Figura 2 – Perfil de uma ilha de calor urbana	30
Figura 3 – Fenômeno de ICU em zonas pavimentadas e não-pavimentadas	31
Figura 4 – Componentes da radiação solar dispersos e absorvidos pela atmosfera e refletidos pela superfície.	33
Figura 5 – Interação da radiação com uma superfície.....	33
Figura 6 – Pireliômetro	37
Figura 7 – Piranômetro.....	38
Figura 8 – Espectroradiômetro	38
Figura 9 – Espectrofotômetro.....	39
Figura 10 – Medidor de energia solar TES-1333	39
Figura 11 – Trecho coloração verde no Rio de Janeiro.....	41
Figura 12 – Trecho coloração amarela no Rio de Janeiro	41
Figura 13 – Pavimento colorido em Portugal.....	42
Figura 14 – Pavimento colorido na China.....	42
Figura 15 – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa	45
Figura 16 – Agregados para esta pesquisa: a) Brita 19mm; b) Brita 12,5mm;	46
Figura 17- PEAD encontrados nos resíduos domiciliares.....	48
Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados.....	49
Figura 19 – Ensaio de penetração antes e após o RTFO	51
Figura 20 – Ponto de amolecimento antes e após envelhecimento em RTFO.....	53
Figura 21 – Curva viscosidade versus temperatura dos ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75	56
Figura 22 – Reômetro DSR.....	58
Figura 23 – Grau de desempenho para o ligante puro.....	59
Figura 24 – Estimativa de temperatura de falha para o ligante puro.....	59
Figura 25 – Símbolos de identificação dos materiais plásticos conforme ABNT NBR 13230.	63
Figura 26 – Simbologia na base de frasco de shampoo de PEAD	64
Figura 27 – Processo do PEAD utilizado neste trabalho	64
Figura 28 – Penetração dos CAPs + PEAD	66

Figura 29 – Ponto de Amolecimento dos CAPs + PEAD	66
Figura 30 – Curva viscosidade versus temperatura do ligante asfáltico CAP 50/70 + PEAD.	67
Figura 31 – Grau de desempenho para os ligantes modificados	68
Figura 32 – Estimativa de temperatura de falha para o ligante puro.....	69
Figura 33 – Fluxograma da Dosagem Superpave	72
Figura 34 – Curva granulométrica Inferior	73
Figura 35 – Curva granulométrica Intermediária	73
Figura 36 – Curva granulométrica Superior.....	74
Figura 37 – Execução do ensaio de Flownumber	78
Figura 38 – Equipamento utilizado no LWT	80
Figura 39 – Nomeação e composição dos CP's para LWT.....	81
Figura 40 – Processo de compactação do corpo de prova de LWT.	82
Figura 41 – CPs antes do procedimento de afundamento e desgaste.....	82
Figura 42 – Execução do ensaio de LWT	83
Figura 43 – Designação e composição das 03 placas.....	85
Figura 44 – Produção do CPs para a placa.....	86
Figura 45 – a) Vista frontal e b) superior da placa medindo 12x12x4cm.....	86
Figura 46 – Placa 1 para medir a refletância e a temperatura superficial fabricada na cor preta	87
Figura 47 – Placa 2 fabricado com ligante modificado e colorida com PEAD na superfície..	87
Figura 48 – Placa 3 para medir a refletância e temperatura superficial, fabricado com ligante do tipo AMP 55/75 e colorida com PEAD na superfície.	88
Figura 49 – Termômetro digital infravermelho modelo Tg8818h Freedom.....	88
Figura 50 – Medidor de radiação solar.....	89
Figura 51 – Resultados do ensaio de Resistência à tração por compressão diametral.....	90
Figura 52 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência.....	92
Figura 53 – Valores do <i>Flow Number</i> obtidos pelo ensaio uniaxial de carga repetida.....	93
Figura 54 – Curvas mestras das misturas asfálticas avaliadas	95
Figura 55 – Módulo dinâmico das misturas asfálticas (4°C)	96
Figura 56 – Módulo dinâmico das misturas asfálticas (20°C)	96
Figura 57 – Módulo dinâmico das misturas asfálticas (40°C)	96
Figura 58 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4°C).....	97
Figura 59 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (20°C).....	98
Figura 60 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (40°C).....	98

Figura 61 – Resultados do dano por umidade induzida	100
Figura 62 – CPs de desgaste, respectivamente, cap 50/70, cap 50/70 modificado com PEAD e AMP 55/75.	101
Figura 63 – Análise do desgaste superficial dos CP's LWT	102
Figura 64 – Placas, respectivamente, cap 50/70 puro, cap 50/70 modificado com PEAD e .	103
Figura 65 – Temperatura das misturas asfáltica	103
Figura 66 – Albedos das misturas asfálticas	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação do albedo dependendo do tipo do material de cobertura	35
Tabela 2 – Valores de albedo de materiais para pavimentos convencionais e frios.	36
Tabela 3 – Ensaio para caracterização dos Agregados	49
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	50
Tabela 5 – Ensaio para caracterização dos Ligantes Asfálticos	51
Tabela 6 – Viscosidades dos ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75	54
Tabela 7 – Temperaturas de Usinagem e Compactação dos ligantes asfálticos.	55
Tabela 8 – Resumo dos ensaios de caracterização dos ligante CAP 50/70.....	62
Tabela 9 – Resultados das viscosidades dos ligantes CAP 50/70 modificados com PEAD	67
Tabela 10 – TU's e TC's para o CAP 50/70 modificado com PEAD.....	68
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de caracterização dos ligante CAP 50/70 modificado com PEAD.	70
Tabela 12 – Proporção dos agregados nas granulometrias	72
Tabela 13 – Resumo da compactação das misturas asfálticas	75
Tabela 14 – Critérios volumétricos para cada teor de ligante	75
Tabela 15 – Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante de projeto	76
Tabela 16 – Testes para avaliação mecânica das misturas asfálticas	76
Tabela 17 – Resumo dos valores de Albedo das misturas asfálticas	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AMP – Asfalto Modificado por Polímero
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials
- AI – Índice de envelhecimento
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CAP – Cimento asfáltico
- CBUQ – Concreto betuminoso usinado a quente
- CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE
- CP – Corpo de prova
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DSR – Dynamic Shear Rheometer
- FN – Flow number
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICU – Ilha de Calor urbana
- LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos
- LVDT – Linear Variable Differential Transducer
- LWT – Loaded Wheel Test
- MR – Módulo de resiliência (MPa)
- NBR – Norma brasileira
- PEAD – Polietileno de Alta Densidade
- RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test
- SUPERPAVE – Superior Performance Asphalt Pavements
- TC – Temperatura de Compactação
- TU – Temperatura de Usinagem
- UTM – Universal Testing Machine

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. LIGANTES ASFÁLTICOS	22
2.1.1. Modificação de ligantes asfálticos.....	23
2.1.2. Modificação de ligantes asfálticos com polímeros	23
2.2. POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)	26
2.2.1. PEAD como modificador de ligantes asfálticos	28
2.3. ILHA DE CALOR URBANA	29
2.4. RADIAÇÃO SOLAR	32
2.4.1. Albedo	34
2.4.2. Métodos de medição de radiação solar.....	36
2.5. ASFALTO COLORIDO.....	40
2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1. MATERIAIS	46
3.1.1. Agregados.....	46
3.1.2. Ligantes asfálticos	46
3.1.2.1. CAP 50/70	47
3.1.2.2. AMP 55/75	47
3.1.3. Polietileno de alta densidade (PEAD)	47
3.2. MÉTODOS.....	48

3.2.1.	Caracterização dos agregados.....	48
3.2.2.	Caracterização dos ligantes asfálticos	50
3.2.2.1.	<i>Ensaio de Penetração</i>	51
3.2.2.2.	<i>Ensaio de Ponto de Amolecimento</i>	52
3.2.2.3.	<i>Viscosidade Rotacional</i>	54
3.2.2.4.	<i>Rolling Thin Film Oven (RTFO)</i>	56
3.2.2.5.	<i>Performance Grade (PG)</i>	57
3.2.2.6.	<i>Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)</i>	60
3.2.2.7.	<i>Resultados dos procedimentos descritos no tópico</i>	61
3.2.3.	Caracterização do PEAD	63
3.3.	MODIFICAÇÃO DO LIGANTE CAP 50/70 COM PEAD	65
3.3.1.	Caracterização dos ligantes asfálticos modificados nos teores 1,2 e 3%	65
3.3.1.1.	<i>Ensaio de Penetração</i>	66
3.3.1.2.	<i>Ponto de Amolecimento</i>	66
3.3.1.3.	<i>Viscosidade Rotacional</i>	67
3.3.1.4.	<i>Grau de Desempenho</i>	68
3.3.1.5.	<i>Resultados dos procedimentos descritos neste tópico</i>	69
3.4.	DOSAGEM DAS MISTURAS PELA METODOLOGIA SUPERPAVE.....	71
3.5.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	76
3.5.1.	Resistência à tração por compressão diametral	77
3.5.2.	Módulo de resiliência	77
3.5.3.	Resistência à deformação permanente.....	78
3.5.4.	Módulo dinâmico.....	79
3.5.5.	Dano por umidade induzida.....	79
3.6.	CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	80

3.7.	TEMPERATURA SUPERFICIAL E QUANTIDADE DE REFLETÂNCIA DAS PLACAS.....	84
3.7.1.	Fabricação das placas	84
3.7.2.	Medição da temperatura superficial	88
3.7.3.	Medição da refletância solar	89
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
4.1.	ANÁLISE MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	90
4.1.1.	Resistência a tração por compressão diametral	90
4.1.2.	Módulo de resiliência	91
4.1.3.	Resistência à deformação permanente.....	93
4.1.4.	Módulo dinâmico.....	94
4.1.5.	Dano por umidade induzida.....	99
4.2.	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS REVESTIMENTOS .	100
4.3.	ANÁLISE DAS REFLETÂNCIAS E DAS TEMPERATURA DAS PLACAS ...	102
4.3.1.	Avaliação da temperatura dos revestimentos	103
4.3.2.	Avaliação da refletância das misturas asfálticas.....	104
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	106
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
5.2.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento dos centros urbanos gerados pelo aumento gradativo da população e unido ao avanço da globalização têm sido uma das principais responsáveis pelas alterações que ocorrem no meio ambiente. Conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a taxa de urbanização do País foi mais recentemente calculada em 2015 e o valor correspondente foi de cerca de 90%, em 2010 correspondia a 84%, taxa essa que em 1970 era 56% e, 30 anos antes, em 1940, era de quase 31%. A evolução dessa taxa mostra que as cidades brasileiras vêm crescendo e expandindo suas áreas urbanas. O crescimento das cidades geralmente ocorre em detrimento das áreas vegetadas.

A falta de controle e o deficiente planejamento da urbanização estão causando diversos efeitos indesejados a sociedade, as mudanças inerentes ao crescimento das cidades têm trazido implicações no microclima das áreas urbanas, que se não forem tratados a tempo poderão causar dano permanente à saúde da população e do planeta. (MELLO, 2014).

De acordo com Kowalski et al., (2020) a modificação do espaço, as edificações com suas formas compostas por vértices, redução das áreas verdes, onde existia vegetação por uma área densamente pavimentada e com superfícies de concreto com características de baixa permeabilidade aliadas a alta absorção da irradiação solar, excesso de veículos nas ruas, assim como impermeabilização do solo, essas modificações ambientais têm como principal consequência o incremento da temperatura dos centros urbanos principalmente quando comparadas às áreas rurais circundantes.

A concentração de pessoas em áreas urbanas e o decorrente revestimento do terreno natural por materiais artificiais favorecem o aumento de temperatura. Esses fatores são causadores do aparecimento do fenômeno de Ilha de Calor Urbanas (ICU), caracterizado pelo incremento das temperaturas urbanas em comparação com as áreas rurais, pode-se dizer então que é um fenômeno associado ao acúmulo, de grandes quantidades de calor devido à absorção da radiação solar durante o dia em pavimentos negros (VILLENNA, 2014).

Nesta perspectiva surgiu uma das práticas mais utilizadas para suavizar os efeitos da ICU, apresentada por Rosenfeld (1998). O qual relata que, esta prática se refere a mudança da cor das superfícies asfálticas escuras para cores mais claras, que sejam capazes de refletir de fato a luz solar.

Em vista dessa problemática ambiental, uma maneira de manter as superfícies pavimentadas mais frias sob a incidência de radiação solar é aumentando o albedo das mesmas, por meio da coloração de superfícies asfaltadas.

Essa mudança da cor das superfícies urbanas pode ser obtida com uso de pigmentos coloridos com o intuito principal de aumentar o valor do albedo da mistura asfáltica, ou seja, aumentar o quantitativo da refletividade solar total de uma superfície, pois ocorre a convecção do calor do pavimento para o ambiente, diminuindo a temperatura. (VEERARAGAVAN et al., 2018). Para tanto, a ideia é fazer com que se reduza a absorção de calor pela camada de asfalto, por meio da utilização de misturas asfálticas coloridas, reduzindo assim, conseqüentemente o incremento das temperaturas urbanas, além de poder melhorar aparência da paisagem urbana. (CARNIELO & ZINZI, 2015).

A pavimentação com asfalto colorido é ideal para ser aplicada em vias especiais que necessitem de maior visibilidade e diferenciação de piso e tem como objetivo principal, o aumento do albedo, que se traduz no aumento da refletividade das superfícies asfálticas. O uso de materiais altamente refletivos em edifícios e estruturas urbanas reduz a radiação solar absorvida e contribui para mitigar a ilha de calor (SYNNEFA et al., 2016).

Autores como Villena(2014), Trichês (2015) e Porto (2019), sugeriram em seus estudos a coloração de misturas asfálticas, no intuito de mitigação de ilhas de calor urbanas, por meio do uso do óxido de ferro, que são amplamente utilizados como pigmentos em tintas, revestimentos e concretos. Em misturas asfálticas com o intuito de sua coloração, além do óxido de ferro podemos propor a análise do PEAD que se trata de um polímero produzido por meio da polimerização por adição do etileno, sendo a maior parte do etileno proveniente do petróleo, obtido por meio do craqueamento da nafta, oriunda do processo de refinamento do petróleo resultando em um termoplástico flexível, de baixa reatividade química. Este material é constituído de uma estrutura molecular simples, regular e estável, de larga utilização na indústria, daí sua grande importância comercial (SAVINI, 2020).

Deste modo explica-se então a escolha por métodos e novas tecnologias em misturas asfálticas, que objetivam a redução desses efeitos causadores das chamadas ilhas de calor urbano, a melhoria na qualidade do pavimento, prezando sempre por durabilidade e segurança para os usuários.

Atrelado a necessidade de mitigação de ilhas de calor urbanas tem-se a preocupação com melhorias nos pavimentos quanto a seu comportamento mecânico, visto que o Brasil é um país altamente voltado para o uso do modal rodoviário, tanto para transporte de pessoas, como de

cargas, o que torna fundamental atentar-se ao estado de conservação das rodovias, que nos dias atuais, por vezes se encontram em situações de uso comprometidos devido ao alto custo de manutenção, causando assim insegurança e prejuízo econômico (SCHROEDER et al., 2016).

Os custos de manutenção de pavimentos são elevados, fato que nos últimos anos tem impulsionando empresas (Tecvia e Fremix, 2021) além de pesquisadores como (França et al., 2019; Silva e Pimentel, 2021; Guimarães, 2019) a buscarem novas alternativas para utilização de novos materiais, que possibilitem uma redução no consumo energético, um aumento na vida útil, além de agilidade em manutenção e operações.

Para Zhang et al. (2015), a deterioração prematura de pavimentos flexíveis construídos com ligantes asfálticos convencionais, justifica a necessidade de modificação destes com vistas a melhorias nas suas propriedades e desempenho.

Agentes modificadores são usados com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e elásticas dos ligantes asfálticos. Fang et al. (2013) afirma que a modificação do ligante tem como função principal melhorar propriedades do material como susceptibilidade térmica, adesividade, resistência à oxidação, resistência ao envelhecimento e durabilidade.

Com vista a minimizar a deterioração prematura de revestimentos tem-se utilizado técnicas de modificação de ligantes asfálticos, tais como fibras (Costa, 2017), resinas (Andrade, 2016), fíleres (Oliveira et al., 2018) e polímeros (Brasileiro, 2019). É comum a adição deste último em ligantes asfálticos sendo, geralmente, incorporados teores variando entre 1 e 6% deste material polimérico ao ligante. Estas incorporações podem conduzir a um melhor desempenho mecânico e redução da suscetibilidade térmica e da deformação permanente.

Conforme Castillo et al., (2016) e Farias et al., (2016) as adições poliméricas nos ligantes asfálticos conferem a estes, melhores resistências a deformações permanentes, trincas térmicas, fadiga, menor suscetibilidade térmica e redução de desagregação entre a matéria asfáltica e os agregados. Dentre essas adições destaca-se o uso de polietileno de alta densidade (PEAD) que conferem resistência e durabilidade em altas temperaturas nas suas propriedades mecânicas.

A partir da problemática exposta, a motivação desta pesquisa foi utilizar PEAD, nos teores 1,2 e 3% para modificação do ligante asfáltico CAP 50/70 e análise das propriedades reológicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas em comparação com convencionais, além disso esta pesquisa avalia a coloração da superfície de misturas asfálticas utilizando PEAD granulado, com vista a minimização das temperaturas das superfícies, e por consequência minimização de ilhas de calor urbanas.

1.1 JUSTIFICATIVA

A preocupação com o meio ambiente tem se mostrado cada vez mais evidente nos últimos anos. Os materiais poliméricos e as ilhas de calor são citados neste trabalho como problemas ambientais a serem minimizados. Deste modo, a indústria de pavimentação tem cada vez mais se interessado em incorporar melhores materiais e buscar estratégias que resultem em rodovias mais verdes e com maior vida útil. Diante disso, este estudo tem fundamental importância no que tange a coloração de misturas asfálticas e a modificação de ligantes com materiais reutilizados do tipo PEAD, altamente disponíveis nos lixos urbanos, tornando este trabalho de fundamental relevância nos contextos social, econômico e ambiental.

Os materiais poliméricos estão entre os principais materiais que mais causam danos ao meio ambiente, quando descartados de maneira incorreta, devido seus prejuízos e longo tempo de decomposição, no entanto grande parte das embalagens de plástico que consumimos podem ser recicladas e reinsertadas na cadeia de produção, livrando o meio ambiente de um amontoado de resíduos. No entanto, essa reciclagem tem um custo, e caracteriza-se, por vezes, por um elevado nível de heterogeneidade de materiais, além da elevada necessidade do uso de água para seu processo, evidenciando assim a importância de buscas por soluções alternativas para a destinação de parte desses materiais.

Uma solução alternativa é a reutilização direta do material PEAD em misturas asfálticas, que em outras palavras, se trata do processo de aproveitamento do material PEAD encontrado na forma de resíduo, sem sua transformação biológica, ou físico-química, sendo este misturado ao ligante asfáltico e aderido as misturas asfálticas para obter uma coloração das superfícies dos pavimentos, sem uma pré-transformação, podendo com isso minimizar, o fenômeno de ilhas de calor urbanas (FORLIN e FARIA, 2020).

Sabe-se que a cor do pavimento acarreta importantes consequências ambientais. Um exemplo disso é a mistura asfáltica convencional que por possuir coloração preta gera aquecimento do ar na região próxima à sua superfície, absorvendo grande porcentagem da radiação solar. Esses e outros malefícios que a coloração escura traz poderiam ser amenizados com o uso de materiais de cores mais claras, que pela redução da energia absorvida pelo pavimento, o mantém mais frio. Tendo em vista a grande contribuição dos pavimentos pretos para o aquecimento da superfície terrestre, as misturas asfálticas coloridas podem agir como elementos mitigadores do efeito da ICU (Ilha de Calor Urbana), que se traduz como um

aumento da temperatura nas regiões urbanizadas em relação as regiões não urbanizadas circundantes.

Para tanto, a ideia é fazer com que se potencialize o uso de pavimentos asfálticos coloridos para serem aplicados em vias que necessitem de maior visibilidade e piso diferenciado, garantindo uma minimização da temperatura no local, promovendo um maior bem-estar e favorecendo o desenvolvimento sustentável através da utilização de técnicas adequadas de pavimentação, melhorando a qualidade dos pavimentos propiciando um revestimento mais resistente a altas temperaturas, além de absorver menos calor, com vista a contribuir positivamente para a sociedade de maneira direta.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar o potencial da utilização de resíduos de PEAD para coloração de misturas asfálticas, além de verificar o comportamento reológico e mecânico de misturas asfálticas modificadas com esses resíduos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os efeitos da incorporação de resíduos de polietileno nas propriedades reológicas e mecânicas de ligantes asfálticos com grau de penetração 50/70.
- Analisar o comportamento mecânico de misturas asfálticas incorporadas com PEAD.
- Investigar o efeito da coloração por incorporação do PEAD no comportamento térmico das misturas.
- Analisar o desgaste da camada de PEAD disposta na superfície das misturas, produzidas com variação nas temperaturas de compactação e nos ligantes utilizados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por 05 capítulos principais que se resumem nesta seção.

No primeiro capítulo é apresentado uma introdução sobre o tema abordado e a justificativa de sua importância e objetivos deste trabalho.

No capítulo 2 é apresentado o embasamento teórico deste trabalho, bem como seu estado de arte, em que mostra que nos últimos anos empresas e pesquisadores buscam cada vez mais novas alternativas para utilização de novos materiais e destinação de resíduos, que possibilitem uma coloração e melhoria no desempenho dos pavimentos asfálticos.

No capítulo 3, foram detalhados os métodos e materiais de pesquisa utilizados para alcançar os objetivos desta. E seus resultados foram apresentados no capítulo 4 .

No capítulo 5, tem-se as considerações finais do trabalho e sugestões de pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para que este trabalho alcance o objetivo proposto, torna-se essencial uma contextualização teórica dos temas que o trata com propósito de fundamentar tecnicamente o estudo. Com isso os temas tratados são: Ligantes asfálticos, polietileno de alta densidade, ilhas de calor urbanas, radiação solar e ligante asfáltico colorido. Estes, a partir de conhecidos serão usados como direcionamento para a análise da problemática citada neste trabalho.

2.1.LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ligantes asfálticos são produtos oriundos, principalmente, da destilação ou refino do petróleo, sendo uma das últimas frações obtidas da torre de destilação (GODOI, 2017). Estas substâncias são utilizadas em serviços de pavimentação como material constituinte das camadas intermediárias e de revestimentos asfálticos, além de elemento de ligação, por possuir características como comportamento termo viscoelástico, insolubilidade em água, resistência à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais; e adesividade, proporcionando forte união entre os agregados.

O ligante asfáltico utilizado em revestimentos asfálticos é aglomerante orgânico, de coloração escura, derivado da destilação do petróleo, cujo componente predominante é o betume, que se trata de uma substância aglutinante, adesiva termoviscoplastica de coloração escura, impermeável à água e com baixa reatividade, que se liquefaz quando aquecido. Com relação a sua constituição, o ligante asfáltico é uma mistura química composta principalmente por hidrocarbonetos e heteroátomos. No Brasil, os ligantes asfálticos que são admitidos em pavimentação asfáltica são denominados de cimentos asfálticos de petróleo (CAPs), também chamados de ligantes asfálticos (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

Os ligantes asfálticos por anos foram utilizados na sua forma convencional, no entanto devido a necessidade de melhorias operacionais e melhores custos, surge o conceito de ligantes modificados. Conforme Silva et al., (2018) durante muitos anos, o desempenho do ligante asfáltico convencional foi considerado aceitável. Contudo, com o aumento do tráfego e das variações climáticas, tornou-se necessário o uso de materiais modificadores para melhorar as propriedades das misturas asfálticas. A partir disso, o estudo e o desenvolvimento de novas tecnologias de materiais para pavimentação asfáltica tem aumentado bastante, motivados pelos

diversos problemas que os pavimentos rodoviários têm enfrentado, como deterioração prematura dos pavimentos, susceptibilidade térmica, oxidação, altas deformações e baixa durabilidade (PEREIRA, 2021).

2.1.1. Modificação de ligantes asfálticos

A aplicação de ligantes asfálticos modificados em pavimentos rodoviários vem crescendo de forma sólida nas últimas décadas. Esse fato justifica-se por motivos diversos como o advento do grande avanço das indústrias de pavimentação, a consagração da utilização de materiais poliméricos em obras de reforços e diversas vantagens que surgem desses fatos como desempenho, durabilidade, etc. (PEREIRA, 2021).

Para Zhang et al. (2015), o aumento das solicitações impostas pelo tráfego aliado às variações climáticas, provocadas pelos fenômenos meteorológicos, tem causado a deterioração prematura de pavimentos flexíveis construídos com ligantes asfálticos convencionais, tornando necessária a modificação destes a fim de melhorar as suas propriedades e desempenho.

Agentes modificadores ou aditivos são utilizados com a função de melhorar as propriedades elásticas e mecânicas dos ligantes asfálticos. Fang et. al. (2013) afirma que a modificação do ligante tem como papel melhorar propriedades do material como adesividade, suscetibilidade térmica, resistência à oxidação, resistência ao envelhecimento e durabilidade. Segundo Azarhoosh (2016) as trincas por fadiga são um dos principais defeitos estruturais que ocorrem em misturas asfálticas a temperaturas ambientes. A utilização de agentes modificadores nos ligantes asfálticos fazem com que estes apresentem maior durabilidade quanto a vida de fadiga.

2.1.2. Modificação de ligantes asfálticos com polímeros

Vários modificadores são usados a fim de aprimorar as características mecânicas de misturas asfálticas, acerca ao uso de ligantes asfáltico puro (SILVA, 2017). Determinados processos de modificação dos ligantes visam tornar o material mais rigoroso sob condições de esforços, fazendo com que sofra pouca deformidade e mais flexível aos esforços, com uma recuperação elástica elevada. Outras características principais ao modificar o CAP são: elevar a coesão do material; reduzir a susceptibilidade térmica; apresentar elevada resistência à

deformação plástica, fissuração e fadiga; garantir boa adesividade e melhor resistência ao envelhecimento (CARVALHO, 2018).

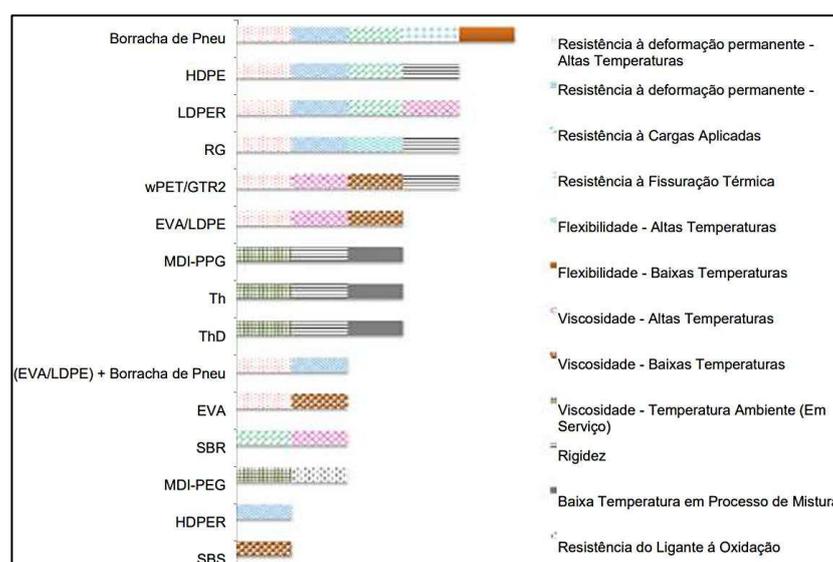
Devido a necessidade de melhorar o desempenho mecânico dos ligantes asfálticos, diversos modificadores são estudados. Os polímeros vêm se apresentando como uma excelente alternativa. A modificação do ligante com polímeros amplia a faixa de temperatura de uso e melhora o desempenho dos pavimentos em condições particularmente severas de tráfego intenso ou de altas concentrações de veículos pesados a baixa velocidade (SILVA, 2017).

A interação entre o CAP e os polímeros resulta num desempenho superior dos revestimentos asfálticos produzidos com tais materiais. Assim, os CAP's modificados por polímeros têm sido utilizados com sucesso em revestimentos asfálticos submetidos à elevadas tensões de tráfego, tais como avenidas com elevado volume de tráfego pesado, pistas de aeroportos, entre outros (GUIMARÃES, 2019).

Silva (2017) complementa que outra principal razão de se combinar ligantes asfálticos com polímeros é prevenir a degradação prematura do pavimento e, desta forma, estender sua vida útil. Assim sendo, a adição dos polímeros promove a redução na susceptibilidade térmica e aumento da ductilidade do ligante, levando a uma maior resistência a deformação plástica a altas temperaturas e suprimindo o aparecimento de fissuras de retração térmica e fadiga.

Na Figura 1 são apresentadas algumas das propriedades que são modificadas nos ligantes asfálticos convencionais com a adição de resíduos poliméricos.

Figura 1 – Propriedades dos ligantes asfálticos melhoradas com a adição de polímeros.



Fonte: GUIMARÃES (2019)

Conforme pode ser visto na Figura 1, existem inúmeros polímeros, no entanto, somente alguns deles apresentam propriedades interessantes para a modificação de ligantes asfáltico. Os polímeros utilizados para finalidades na pavimentação asfáltica levam em consideração o tipo do polímero e a qualidade, as propriedades de recuperação elástica, com superior ponto de amolecimento, aperfeiçoamento da suscetibilidade térmica, maior adesão e principalmente a combinação das misturas asfálticos e melhor resistência ao envelhecimento (MORILLA, 2004).

Para que a modificação do ligante seja viável técnica e economicamente, faz-se necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização do ligante asfáltico, e misture-se adequadamente com o ligante, melhorando as características de fluidez a altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para a mistura e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço a baixas temperaturas (ARAÚJO, 2016). O autor ainda atenta para que a temperatura de aquecimento do ligante asfáltico polimérico deve ser em função do teor de polímero, sendo a temperatura conveniente para aquecimento do ligante de no máximo 180°C.

Diversos são os autores que estudaram os polímeros na modificação de ligantes asfálticos, tais como Yuliestyan, et al., (2018), que analisou as propriedades do ligante asfáltico modificado com polímeros de etileno-acetato de vinila (EVA), Kim (2019) estudou a avaliação de desempenho de ligantes modificados com polímero contendo borracha de pneu moída (GTR), Hesami, Sadeghi e Asisi (2021) que fizeram uma investigação das propriedades reológicas de betume modificado com poliuretano sintetizado por pré- polímeros reativos (MDI – PPG), e Hong (2022), que estudou o efeito do estireno-butadieno-estireno (SBS) nas propriedades laboratoriais do asfalto modificado composto de polietileno de baixa densidade (LDPE)/etileno-vinil acetato (EVA). Tang et al., (2018), que estudou as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados por resinas sintéticas de cor clara contendo a combinação de SBS, EVA e PE. Esses e outros autores ressaltam vantagens do uso de polímeros em misturas asfálticas.

Por fim, Brasileiro (2019) completa que a possibilidade de incorporar esses polímeros como modificadores de ligantes asfálticos é uma nova maneira de estender sua aplicabilidade, evitando que eles sejam destinados a aterros sanitários ou quando não reciclados, destinados incorretamente ao ambiente. Assim, benefícios econômicos e ambientais, juntamente com a melhoria nas propriedades do ligante, poderiam contribuir para um aumento no uso de polímeros reciclados para modificação de ligantes.

Dentre essas adições, Guimarães (2019) destaca o uso do polietileno de alta densidade (PEAD) que conferem resistência a deformações permanentes e durabilidade em altas temperaturas.

2.2. POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

De acordo com o relatório anual do Fundo Mundial para a Natureza (WWF) do ano 2019 relatasse que aproximadamente 37% de todo o lixo plástico mundial não está sendo tratado de forma eficiente, de modo que há uma preocupação eminente com a má gestão desses resíduos plásticos, sendo provável que esses resíduos virem poluição. (WIT, 2019).

No Brasil não é diferente, segundo dados do Banco Mundial, nosso país é o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo, com um registro de 11,3 milhões de toneladas. Desse total, mais de 10,3 milhões de toneladas são coletadas (91%), mas apenas 145 mil toneladas (1,28%) são efetivamente recicladas, ou seja, reprocessadas na cadeia de produção como produto secundário. Esse é um dos menores índices da pesquisa e bem abaixo da média global de reciclagem plástica, que é de 9%. Mesmo parcialmente passando por usinas de reciclagem, há perdas na separação de tipos de plásticos (por motivos como estarem contaminados, serem multicamadas ou de baixo valor). No final, o destino de 7,7 milhões de toneladas de plástico são os aterros sanitários. E outros 2,4 milhões de toneladas de plástico são descartados de forma irregular, sem qualquer tipo de tratamento, em lixões a céu aberto. (KAZA, 2018).

Conforme o anuário de 2017 elaborado pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), o PEAD representa pelo menos 13,6% do consumo de plástico no Brasil no ano do estudo, ficando atrás somente do Polipropileno (PP), que representou 21,6% do total. Sabe-se que em nível mundial, aproximadamente 40% dos resíduos plásticos são enviados diretamente a aterros, onde são necessários mais de 400 anos para decomposição (WIT, 2019).

No entanto o Brasil enfrenta inúmeros obstáculos para que a reciclagem aconteça de forma efetiva e constante, para Spinacé e De Paoli (2015), os polímeros são considerados os grandes vilões ambientais, pois levam anos para se degradar, e uma forma de minimizar o impacto causado pelos polímeros ao meio ambiente é a reciclagem, todavia esse é um processo extremamente sistemático, que para se garantir o sucesso da reciclagem de polímeros são necessárias quatro condições básicas: contínuo fornecimento de material bruto coletado, separação e esquemas de pré-tratamento, tecnologia de conversão adequada, e viabilidade econômica.

No entanto, alcançar as condições de sucesso na reciclagem é altamente complexo, e do ponto de vista econômico a reciclagem de polímeros não é considerada uma atividade com alto retorno financeiro, principalmente devido ao custo da coleta seletiva, que pode ser até cerca de oito vezes maior que a convencional e a enorme diferença de preço entre a resina reciclada (mais cara) e a resina virgem é um ponto desmotivador para muitos investimentos em reciclagem (PEREIRA, 2015).

Outra questão é que a reciclagem mais utilizada no Brasil é a mecânica, essa por sua vez é viabilizada através do reprocessamento por extrusão, injeção, termoformagem, moldagem por compressão, etc. Para este fim são necessários alguns procedimentos que incluem as seguintes etapas: 1) separação do resíduo polimérico, 2) moagem, 3) lavagem, 4) secagem, 5) reprocessamento e, finalmente, a transformação do polímero em produto acabado (SANTOS, 2021). Existem variações nestas etapas devido à procedência e o tipo de polímero, além das diferenças de investimentos e equipamentos utilizados nas plantas de processamento, o eleva o custo da reciclagem desses materiais, além da elevada a quantidade de água necessária para se obter o reaproveitamento desse material, na etapa de lavagem, que é um problema especialmente em uma região que convive com a escassez de água (BORDONALLI & MENDES, 2009).

No caso de alguns plásticos flexíveis e termoplásticos, especificamente das embalagens pós consumo, devido à sua espessura, densidade relativa, nível de contaminação e dificuldade de separação dos diferentes materiais que as compõem (no caso das multicamadas), há uma série de problemas e dificuldades técnicas ao processo tradicional de reciclagem mecânica tornando este processo inviável economicamente em muitos casos, desse modo é possível notar que várias são as dificuldades, os desafios e o aumento da complexidade no processo de reciclagem ao se variar as condições em que as embalagens plásticas pós-consumo se apresentam considerando-se: a embalagem plástica na sua forma, heterogeneidade da composição de materiais, presença de sujidade, contaminação, estrutura multicamada/multimateriais, tinta de impressão, que no caso do PEAD, por exemplo, tem que separar por cor. Cada uma destas variantes contribui com o aumento das dificuldades para obtenção de material de boa qualidade e em condições para reutilização baseado na economia circular.(ASSIS & SANTOS, 2020).

Por essas e outras razões o meio ambiente vem sofrendo com a disposição inadequada de resíduos plásticos na natureza, motivo pelo qual, esforços têm sido realizados, para estes sejam

depositados em lugares adequados ou ainda que possam ser empregados durante a produção de outros materiais, como é o caso do polietileno de alta densidade.

O PEAD é um importante termoplástico semicristalino com uma vasta gama de aplicações devido à sua combinação atrativa de alta processabilidade, boas propriedades mecânicas, excelente biocompatibilidade, boa resistência química, reciclabilidade e baixo custo. Geralmente presentes em brinquedos, garrafas de produtos de limpeza e de higiene e vários itens de utilidades domésticas (SAVINI, 2020).

Tais propriedades permitem que ele possa ser aplicado em vários materiais, como: filmes para embalagens industriais e agrícolas, filmes destinados a embalagens de alimentos, revestimento de fios e cabos, tubos e mangueiras, baldes e bacias, frascos, tampas para garrafas e potes, embalagens para detergentes, redes para embalagem de frutas, fitas decorativas, sacos para lixo e sacolas de supermercados, fraldas descartáveis, lonas em geral, brinquedos, plástico bolha, artigos flexíveis e peças de uso geral, tubos, bombas, válvulas, filtros, tampas de caixa de sucção, régua e perfis (COUTINHO, 2003).

Contudo, uma alternativa a destinação de PEAD, é que ele pode ser usado na modificação de CAPs para fornecer maior resistência às deformações permanentes em altas temperaturas, além de melhorias em diversas outras propriedades mecânicas (GIBREIL & FENG, 2017).

2.2.1. PEAD como modificador de ligantes asfálticos

O PEAD trata-se ainda de um plastômero que amolece chegando a fluir quando submetido ao aquecimento, e volta a ser sólido e rígido quando a temperatura é reduzida. O ponto de fusão varia entre 130 e 149 °C. Essas temperaturas estão abaixo da faixa de temperatura que é comumente usada na produção de misturas asfálticas a quente. Por esta razão, estes materiais podem ser facilmente incorporados ao ligante e quanto mais baixo o ponto de fusão em relação à temperatura da mistura, menor a velocidade necessária para misturar (FANG, 2015).

A porcentagem de polietileno adicionada ao ligante pode variar entre 1% e 10% em peso de ligante, sendo as porcentagens mais comuns entre 2% e 5% . Existem também variações na maneira como o polímero é incorporado ao ligante. Podendo variar a temperatura de mistura entre 150 e 180 °C, o tempo de digestão entre 3 min e 4 h e a velocidade do misturador utilizado varia entre 120 e 7200 rpm (BRASILEIRO et al., 2019).

Autores como Manoel (2015), confirma que os resultados relativos aos índices de susceptibilidade térmica de seus estudos com PEAD, mostraram, uma grande sensibilidade desse parâmetro com a incorporação de polímeros ao CAP, possibilitando tornar os asfaltos modificados por polímeros (AMPs) menos susceptíveis às variações térmicas, conforme Guimarães (2019), a adição dos polímeros do tipo PEAD aumenta a resistência à deformação permanente. Fontoura (2019) e Murana (2020), afirmam que a adição dos PEAD viabiliza a utilização dos AMPs como ligante para pavimentos em temperaturas mais elevadas ou com alto volume de tráfego, possibilitando também o aumento de sua consistência.

A partir da literatura sabe-se que diversos estudos já testaram PEAD em misturas asfálticas, tanto como modificador de ligante como agregado substituindo o pó de pedra, como é o caso do estudo de Vasconcelos (2020), que concluiu que o PEAD também pode servir como agregado miúdo desde que passado por um minucioso processo de tratamento e moagem, todavia ele ainda não foi testado para efeito de coloração, com vista a minimização de ICU.

2.3. ILHA DE CALOR URBANA

A Ilha de Calor Urbana (ICU) é um dos principais fenômenos associados ao clima urbano, significando que determinada área urbana apresenta condições microclimáticas diferentes em relação às áreas rurais ou que conservam sua paisagem natural. (CALLEJAS et al., 2015).

Assim, o fenômeno das ICU pode decorrer do adensamento urbano, caracterizado por geometrias que barram os ventos e aumentam a taxa de absorção do calor; o aumento do albedo (dada a constante impermeabilização do solo); além da ação antrópica de remoção de vegetação e conseqüente redução da evapotranspiração trazem também uma diminuição significativa da umidade relativa do ar. Pode-se observar que as temperaturas de ar no meio urbano são mais elevadas em relação as áreas mais afastadas, que juntamente com o aquecimento das superfícies artificiais caracterizam a formação de ilhas de calor urbana. (ROMERO et al , 2020).

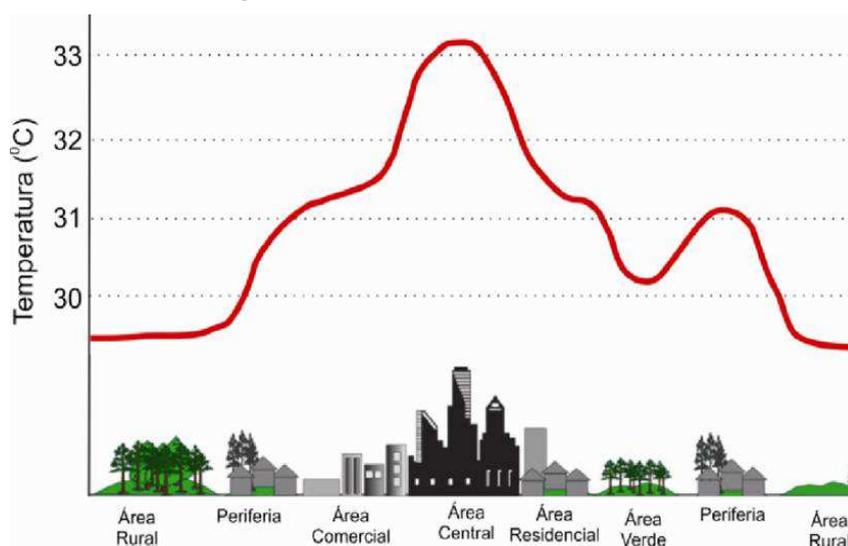
As áreas urbanas apresentam uma grande variedade de tipos de superfície, devido à substituição de elementos naturais por elementos artificiais, por conseqüência disso há uma interferência na estrutura do meio ambiente que pode provocar alterações no ecossistema. As mudanças na rugosidade da superfície, albedo, capacidade térmica, condutividade térmica, emissividade e a poluição irão causar, sobretudo, alterações no balanço de energia urbano, vento, temperatura, umidade do ar, resultando em problemas ambientais (ARNFIELD, 2003).

As diversas características de cobertura do solo influenciam o aparecimento de um gradiente horizontal de temperatura, conhecido como fenômeno da ilha de calor urbana. A estrutura do ambiente urbano absorve e emite uma quantidade maior de energia em relação a áreas rurais, pelo fato de que os materiais típicos de uma superfície urbana apresentam, em média, menor albedo, menor capacidade térmica e maior condutividade de calor (ALVES & VECCHIA, 2012).

A formação de ilhas de calor e o déficit de umidade são algumas das anomalias encontradas em áreas urbanas, e a causa direta desses fenômenos está relacionada aos processos de troca de energia, mais especificamente aos componentes do balanço de radiação (ZHANG, 2019). Além disso, as massas de ar sobre a cidade deslocam-se mais lentamente do que sobre a área rural, devido ao incremento da rugosidade do solo que altera a velocidade dos ventos os quais modificam o seu fluxo, dando-lhes características peculiares (WIDÉN & MUNKHAMMAR, 2019).

Na Figura 2, vê-se o perfil de uma ilha de calor urbana, em que o clima urbano é destaque por ter uma temperatura que pode ser 1° ou 2° C mais elevado que em áreas circunvizinhas, podendo chegar, em alguns casos, uma diferença de até 3° C, decorrentes de ausência de arborização predominante, baixa existência de terreno natural, impermeabilização da superfície do solo (ex: concreto e asfalto) e um mínimo possível de construções civis.

Figura 2 – Perfil de uma ilha de calor urbana

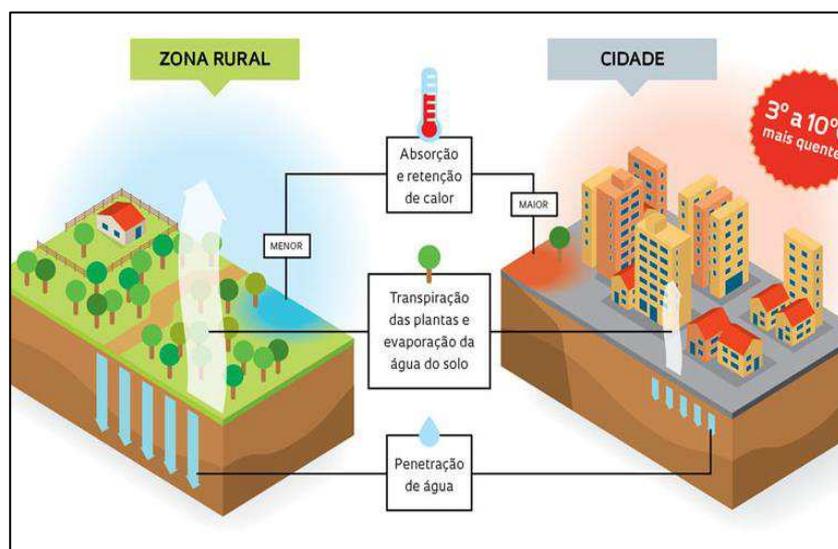


Fonte: AZEVEDO (2013)

As alterações ambientais que resultam em ICU são refletidas diretamente na qualidade de vida da população, uma vez que, o aumento da poluição e da quantidade de calor emitido nos centros urbanos, dará origem a diversos impactos ambientais, resultando diretamente em danos provocados à saúde, ao conforto térmico e à economia da população (PORTO, 2019).

Ao compararmos as temperaturas nas áreas rurais e urbanas, nota-se que nas áreas rurais geralmente tem arborização predominante, existência de terreno natural e um mínimo possível de construções civis, o que caracteriza uma área com propriedades térmicas de condução de calor mais lenta e por consequência uma diminuição na temperatura, já nas áreas urbanas as temperaturas são mais elevadas, isso devido aos mais diversos fatores, tais como: centros urbanos pouco arborizados, terreno revestido por material artificial e um elevado número de prédios, além disso analisando alguns dos materiais das construções urbanas, como os pavimentos de cor escura, percebe-se que estes apresentam propriedades térmicas que facilitam a condução de calor mais rapidamente do que o solo e a vegetação das áreas rurais, contribuindo para uma elevação na diferença de temperatura entre essas regiões, o que gera o que chamamos de fenômeno de ICU, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Fenômeno de ICU em zonas pavimentadas e não-pavimentadas



Fonte: PIVETTA (2012)

Tendo em vista a crescente preocupação com o meio ambiente e suas temperaturas, busca-se uma minimização dos efeitos causadores das Ilhas de Calor Urbano, e é sabido portanto que, o uso extensivo de materiais de alto albedo (ou de alta refletância), são capazes de obter resultados bastante satisfatórios, levando-se em consideração que, esses materiais

atingem um maior índice de radiação solar, e estão predispostos a absorverem uma menor quantidade de energia, portanto, conseqüentemente evidenciam significativas reduções na temperatura superficial (KRUGER e GONZALEZ, 2016).

Tendo em vista a obtenção de alguns benefícios quando se atenua a ICU, dentre eles: proteção da vegetação nativa das áreas urbanas (as matas ciliares dos rios, por exemplo), criação de áreas verdes nas cidades, com arborização das ruas e construção de parques públicos, além de melhor visibilidade com a coloração mais claras de vias urbanas (ROMERO et al., 2020).

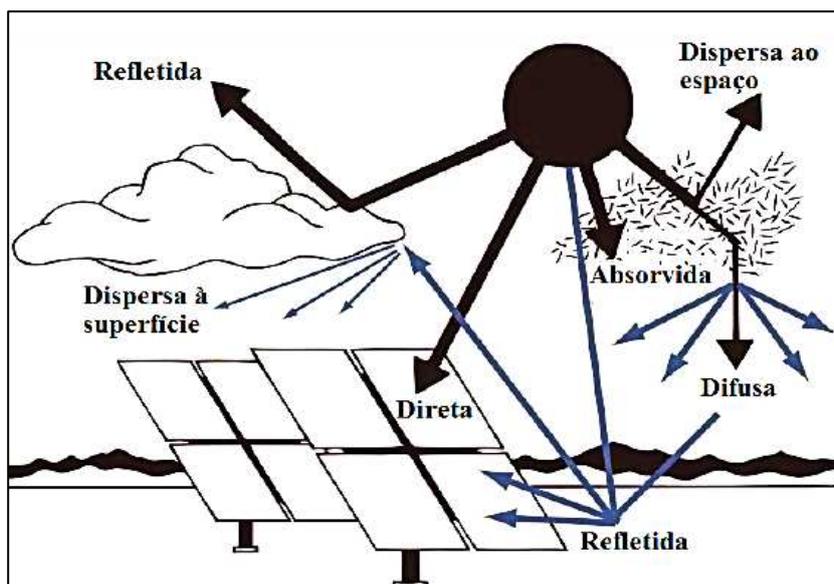
2.4. RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é o termo comum para se referir à radiação eletromagnética emitida pelo Sol. Considera-se que toda a energia radiante recebida pela Terra é emanada do Sol como radiação solar, que é incidente na superfície terrestre através dos processos físicos de condução, irradiação e convecção, que podem alterar os balanços energéticos e acabam aquecendo o solo e ar, assim aumentando a temperatura do ar (KOWALSKI, et al. 2020.).

Esse calor é o resultado da incidência de radiação de onda curta durante o dia. Prado e Ferreira (2005) descrevem que as ondas eletromagnéticas podem ser classificadas em função de seu comprimento de onda. No espectro solar, elas podem pertencer à faixa do Visível, Ultravioleta ou Infravermelho. Sendo a radiação ultravioleta a parte responsável pelo envelhecimento dos materiais e a radiação infravermelha pela variação da temperatura.

Quando a radiação solar entra na atmosfera terrestre, uma parte da energia incidente é removida por dispersão ou absorção pelas moléculas de ar, nuvens e outros materiais particulados, geralmente denominados de aerossóis. A radiação que não é refletida ou dispersa e que atinge a superfície diretamente desde o Sol é chamada de radiação direta. A radiação dispersa que atinge o solo é chamada de radiação difusa. Uma parte da radiação pode atingir um material após refletida pela superfície terrestre e é chamada de irradiação refletida pelo solo. A irradiância total consistente de três componentes (direta, difusa e refletida) é chamada radiação global ou total, como mostrado na Figura 4. A radiação total solar recebida por uma superfície inclinada, é uma combinação da radiação direta, difusa e radiação adicional refletida pelo solo, denominado como R , é chamada de radiação hemisférica total sobre uma superfície inclinada (BADESCU, 2008).

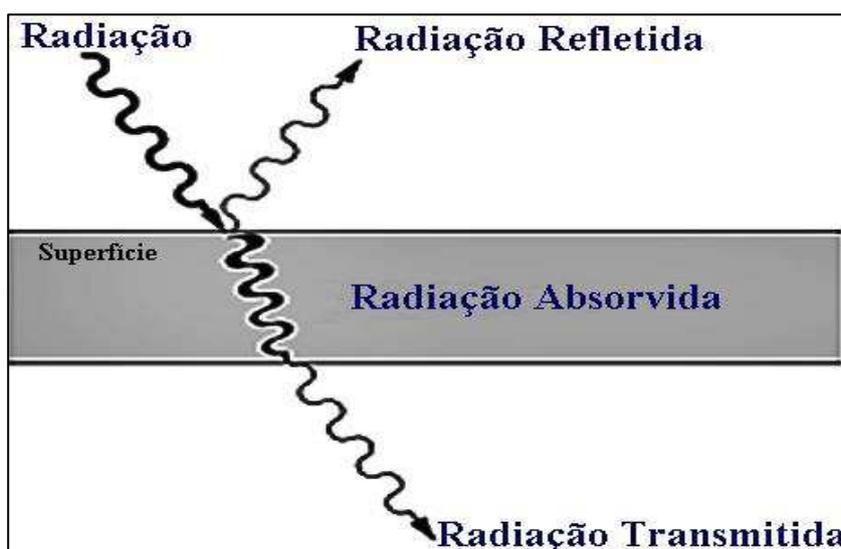
Figura 4 – Componentes da radiação solar.



Fonte: VILLENA (2014)

A energia do espectro eletromagnético que atinge a Terra pode ser total ou parcialmente transferida para a matéria. Esta transferência se dá a níveis atômicos e envolve a interação dos fótons da radiação e os elétrons dos átomos do material onde a onda está incidindo. Em uma linguagem simples, as três propriedades fundamentais radiativas a nível macroscópico ou de superfície são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Interação da radiação com uma superfície.



Fonte: Adaptado de SANTOS *et al.* (2018)

De acordo com Kowalski (2020), o desempenho térmico dos materiais é determinado por suas características de absorvância e refletância, a qual varia em função da coloração da superfície. A refletância solar, ou albedo é a fração de radiação solar incidente, que reflete ao entrar em contato com a superfície.

2.4.1. Albedo

O albedo, às vezes chamado de "coeficiente de reflexão" é a razão entre a radiação refletida e a incidente de uma superfície, sendo uma importante medida quantitativa da refletividade solar total de uma superfície (DANTAS, 2018). O albedo de superfícies urbanas está diretamente relacionado à sua capacidade de absorver energia ou refleti-la para as superfícies adjacentes, influenciando sobre as condições microclimáticas e de conforto térmico em nível do pedestre no espaço aberto (FANTON, 2020). A refletância de um material pode ser alterada por vários aspectos, como composição, direção dos raios solares e textura da superfície, segundo Villena (2014), os valores da refletância podem variar dependendo do desgaste do material, coloração da superfície e envelhecimento. De acordo com Doulos et al (2004), o desempenho térmico dos materiais é determinado por suas características de absorvância e refletância, a qual varia em função da coloração da superfície. A medida do albedo, é a quantidade de radiação solar refletida por um corpo e a quantidade de radiação absorvida por ele, como demonstrado na Equação 1.

Equação 1

$$A = \frac{Rr}{Ra}$$

Em que: A = Albedo Rr = Radiação solar refletida Ra = Radiação solar absorvida

O balanço de radiação em uma determinada superfície é resultado da soma de toda energia radiante recebida e perdida pela superfície, daí vem a enorme influência das superfícies no valor do albedo, pois as variadas características de cobertura do solo, sendo texturo, tipo de material, e inclusive a coloração, tudo isso influenciam no aparecimento de um gradiente de reflexividade e absorção de calor da superfície, ou seja existem superfícies que absorvem mais calor que outras e por consequência tem uma maior temperatura associada, daí parte que superfícies de cores mais claras tendem a ser mais frias, pois absorvem menos calor, em comparação a superfícies escuras.

Na Tabela 1, nota-se que os componentes, tipicamente utilizados na constituição do meio urbano, têm maior capacidade de retenção de energia do que os que constituem o meio rural. Dessa forma, o meio urbano possui maior capacidade de armazenamento de energia.

Tabela 1 – Variação do albedo dependendo do tipo do material de cobertura

Superfície	Albedo
Solos	0,05 – 0,40
Gramma	0,16 – 0,26
Floresta	0,13 – 0,23
Água	0,08 – 0,10
Concreto	0,10 - 0,35
Asfalto	0,05 – 0,2
Tijolo	0,20 – 0,40
Rocha	0,2 – 0,35
Cascalho	0,08 – 0,18
Cerâmica	0,10 – 0,35

Fonte: Adaptado de ALVES E VECCHIA (2012)

As superfícies de cor clara, têm um albedo elevado, refletindo quase a totalidade da energia solar nelas incidente, logo não aquecem muito, já as superfícies de cor escura têm um albedo reduzido, o que se traduz numa grande absorção de radiação solar e num consequente aquecimento, em outras palavras, quanto maior a reflexão, menor será o calor acumulado.

O albedo dos centros urbanos é consideravelmente menor em comparação com as zonas rurais circundantes principalmente por causa da irregularidade da estrutura urbana e da utilização de materiais artificiais substituindo áreas verdes, tal como o caso da pavimentação com revestimentos pretos. Observa-se na Tabela 2 os valores de albedo de alguns materiais mais utilizados na pavimentação de estradas, de estacionamentos e de calçadas, nela nota-se que os valores de albedo das superfícies asfálticas convencionais giram em torno de 5% sendo menores que os das misturas coloridas que chegam a 55%.

Tabela 2 – Valores de albedo de materiais para pavimentos convencionais e frios.

Superfície	Albedo
Mistura asfáltica convencional nova	0,04 – 0,06
Mistura asfáltica convencional envelhecida	0,09 – 0,18
White asfáltica convencional envelhecida	0,30 – 0,45
Mistura asfáltica colorida fria	0,27 – 0,55
Placa de concreto de cimento Portland cinza	0,12 – 0,20
Placa de concreto de cimento Portland branca	0,60 – 0,77
Bloco de concreto com pigmento frio (Vermelho, amarelo, cinza)	0,45 – 0,49
Telha de concreto fotocatalítica branca	~ 0,77
Mármore branco	0,65 – 0,75
Mármore escuro	0,20 – 0,40
Telha de concreto com pigmento frio (cinza, verde, bege)	0,61 – 0,68
Telha de borracha velha	0,07 – 0,10
Granito escuro	0,08 – 0,12

Fonte: SANTAMOURIS *et al.* (2011).

Para Ismagilova (2019) a busca por um aumento do albedo urbano visa reduzir as temperaturas ambientais, resultando em uma melhor qualidade de vida, uma vez que tende a amenizar o desconforto térmico acarretado por temperaturas mais elevadas, além de possibilitar a diminuição no consumo de energia para refrigeração de ambientes, ou seja, redução dos custos de ar condicionados, no entanto para que essa redução aconteça é necessária a utilização de materiais com maiores albedos que promovam uma maior reflexão e menor absorção de calor pelas superfícies pavimentadas.

2.4.2. Métodos de medição de radiação solar

A medição da radiação solar é muito importante para o desenvolvimento de estudos que visam comparar superfícies de pavimentos com diferentes colorações. Com o conhecimento dessas medidas, pode-se definir a viabilidade de certos materiais nas camadas de revestimento,

onde as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações, a depender da cor do pavimento.

Conforme Rosso (2019) existem dois instrumentos mais utilizados para a medição da irradiação solar: o pireliômetro e o piranômetro, sendo o pireliômetro usado para medições da irradiação direta e o piranômetro para irradiação global (direta + difusa).

Figura 6 – Pireliômetro



Fonte: GEODESIGN (2020)

Os pireliômetros, como visto na Figura 6, são instrumentos utilizados para medição em sistemas de concentradores solar, nesses sistemas somente a componente direta da radiação é utilizada para conversão da energia solar. A medição da irradiância com o piranômetro, conforme Figura 7, é feita a partir da densidade do fluxo de radiação global, ou somente direta ou difusa, em comprimentos de ondas, que vão desde o ultravioleta ao infravermelho do espectro eletromagnético, este instrumento possui uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies. Os piranômetros também possuem os Fotodiodos, que são dispositivos eletrônicos fotossensíveis, que alteram suas características conforme a incidência de luz, e convertem os sinais óticos em sinais elétricos do tipo analógico.

Figura 7 – Piranômetro

Fonte: ROSSO (2019)

Além desses tem-se ainda o Espectroradiômetros, ver Figura 8, que se trata de um sistema que coleta as informações das bandas espectrais incidentes pela radiação solar na sua superfície captadora. Sua aplicação está associada a qualificação da radiação solar, especificando as bandas espectrais.

Figura 8 – Espectroradiômetro

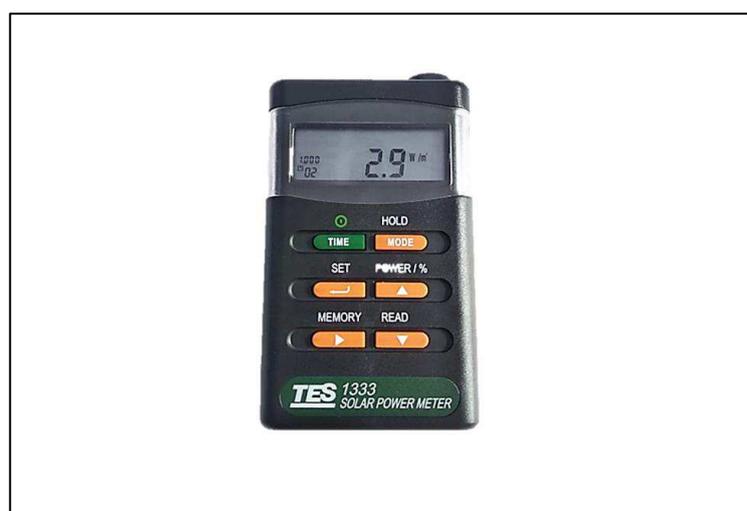
Fonte: DIRECTINDUSTRY (2020)

Ainda para este fim, pode se utilizar o Espectrofotômetro, visto na Figura 9, trata-se de um instrumento usado para medir a intensidade dos comprimentos de onda em um espectro de luz em comparação com a intensidade da luz de uma fonte padrão, ou seja, capaz de medir o brilho das várias porções de espectros.

Figura 9 – Espectrofotômetro

Fonte: KASVI (2020)

Por fim, tem o medidor de energia solar digital portátil, utilizado nesta pesquisa. Sendo um instrumento compacto, resistente e preciso para medir a radiação solar em campo, conforme pode ser visto na Figura 10. Munido de sensor de radiação solar empregado na forma de detector fotovoltaico de silício de alta estabilidade. Para medição da energia solar com correção do cosseno total para o ângulo de incidência da radiação e obtenção da energia solar irradiada.

Figura 10 – Medidor de energia solar TES-1333

Fonte: Própria da pesquisa (2021)

2.5. ASFALTO COLORIDO

Sabe-se que coberturas asfálticas apresentam superfícies com temperaturas bastante elevadas, isso se deve principalmente à cor escura que o ligante asfáltico apresenta. Sob forma de calor, intensas quantidades de radiação solar são armazenadas pelo revestimento nas superfícies asfálticas (VILLENA, 2014).

No intuito de diminuir tanto as temperaturas superficiais, quanto no interior do revestimento, e incrementar nesse caso, a refletância solar ou o albedo como dito anteriormente, surge como novas tecnologias de coloração de ligantes asfálticos, com o uso de materiais, que possibilitam reduzir a quantidade de radiação solar absorvida pelo pavimento, diminuir a temperatura do ar e minimizar o fenômeno da ilha de calor urbano (TRICHÊS, 2014).

O ligante asfáltico colorido, surgiu devido algumas necessidades de melhoramento dos ligantes asfálticos das estradas, uma vez que o uso desses materiais pode diminuir a temperatura do ar e mitigar o fenômeno de ICU. O ligante asfáltico colorido é visto também como resistente, e já vem sendo adotado em algumas vias do país (MARINOSKI et al, 2015).

Uma das principais entregas da pavimentação com ligante asfáltico colorido é a segurança viária proporcionada pela engenharia de tráfego. O pavimento é ideal para ser aplicado em vias especiais como ciclovias, ciclofaixas, pistas de cooper e atletismo, calçadas, parques, estacionamentos, condomínios, postos de combustíveis, helipontos, clubes de golfe, entre outras, unindo assim fatores funcionais e estéticos no que tange design urbanístico e paisagístico e durabilidade de pavimento, gerando uma integração mais harmoniosa com o ambiente (VILLENA, 2014).

Assim cada vez mais atenção é dada ao pavimento asfáltico colorido devido ao seu domínio de desempenho e aparência, e o pavimento asfáltico colorido tem sido aplicado em muitas cidades. No Brasil, por exemplo, tem a estrada Dona Castorina, no Mirante do Horto, que foi a primeira via da cidade a receber um tipo de ligante asfáltico colorido, com a escolha da cor verde para harmonizar com o ambiente de floresta, além de ser um revestimento que tem resistência a elevadas temperaturas, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Trecho coloração verde no Rio de Janeiro



Fonte: BETUSEAL (2016)

A aplicação na Estrada Dona Castorina foi um teste para que a Secretaria Municipal de Obras do Rio de Janeiro, pudesse conhecer melhor a forma de produção, aplicação e comportamento do revestimento colorido, a fim de empregar o ligante asfáltico colorido em ciclovias, acostamentos e parques, podendo ser aplicado também em túneis. A pavimentação colorida, conforme LIN e LUO (2014), permite uma melhor configuração visual do pavimento.

Outro exemplo ainda no Rio de Janeiro ocorreu quando a usina de ligante asfáltico da Craft realizou a sua primeira experiência em um trecho de 3 mil m², com a coloração amarela, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12 – Trecho coloração amarela no Rio de Janeiro



Fonte: CRAFT (2016)

Em países como Portugal, Espanha, China, Inglaterra e Estados Unidos, o emprego deste tipo de revestimento já é consagrado. A rua dos bacalhoeiros, é um exemplo em Portugal, conforme ilustra a Figura 13, para este caso a pintura da superfície asfáltica é considerada uma forma rápida e simples de colorir as ruas.

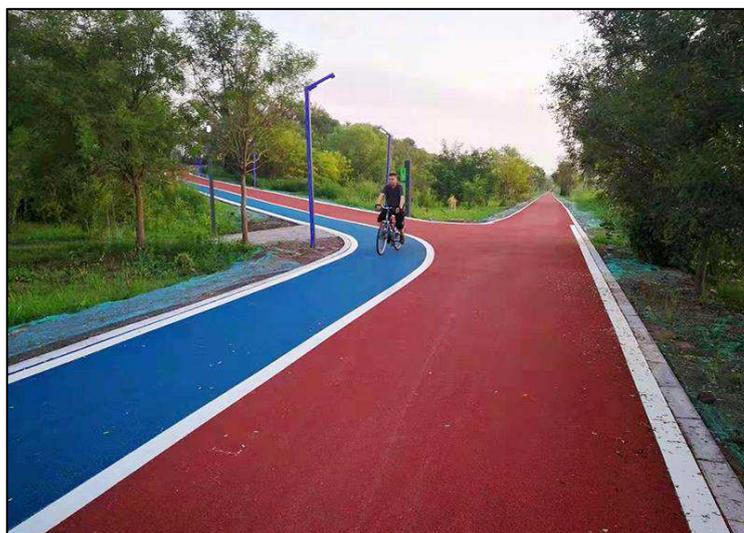
Figura 13 – Pavimento colorido em Portugal



Fonte: PINCHA (2020).

A Figura 14, ilustra a utilização de pavimentação colorida na China, em que são utilizados selantes coloridos com o intuito de promover vantagens ao pavimento, incluindo o embelezamento das vias, melhoria na superfície e ainda evita que haja qualquer tipo de infiltração de água no ligante asfáltico. O selante pode ser aplicado em rodovias com grande circulação e até em outros tipos de locais, como em estacionamentos e caminhos ecológicos.

Figura 14 – Pavimento colorido na China



Fonte: WANHONG (2020)

Esses foram exemplos de pavimentos coloridos em suas superfícies com matérias industrializados, no entanto existem estudos que trabalham na temática, os quais utilizam outros materiais para este fim e ainda sua coloração inerente as misturas asfálticas, sem a necessidade de pintura posterior.

Tang (2018), por exemplo, proporcionou em seu estudo o ligante asfáltico colorido preparado por meio de resina sintética .

Villena (2014) e Trichês (2015) estudaram a coloração de misturas asfálticas com pigmentos inorgânicos de óxidos metálicos mistos em pó nas cores amarelo, marrom, preto, verde e vermelho.

Porto (2019), por exemplo, sugere a coloração por meio do uso do óxido de ferro, nas cores amarelo e vermelho, que são amplamente utilizados como pigmentos em tintas, revestimentos e concretos.

Muitas das misturas asfálticas coloridas são obtidas a partir da adição de pigmentos, que são substâncias orgânicas ou inorgânicas, insolúveis ou substancialmente insolúveis na água ou meio aquoso. Sendo eles capazes de fornecer cor, opacidades, rigidez mecânica dentre outras propriedades a fase a qual estão dispersos (MALSHE e BENDIGANVALE, 2008). Os pigmentos em sua maioria derivados de OMM (Óxidos Metálicos Mistos) devido as suas propriedades são ideais para serem utilizados na indústria de materiais frios, dentre uma das possibilidades a adição dos mesmos à mistura asfáltica.

Deste modo, evidencia-se a possibilidade de analisar a viabilidade dos materiais coloridos aderidos a superfície, como uma forma alternativa de redução de albedo e destinação final ambientalmente adequada para polímeros, por exemplo, do tipo PEAD.

Nota-se na literatura diversos estudos com o PEAD sendo usado na modificação de ligantes para pavimentos. No entanto, não se encontra na literatura, até o presente momento o PEAD sendo testado para efeito de coloração de misturas asfálticas para superfícies de pavimentos, ressaltando assim a importância deste trabalho.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

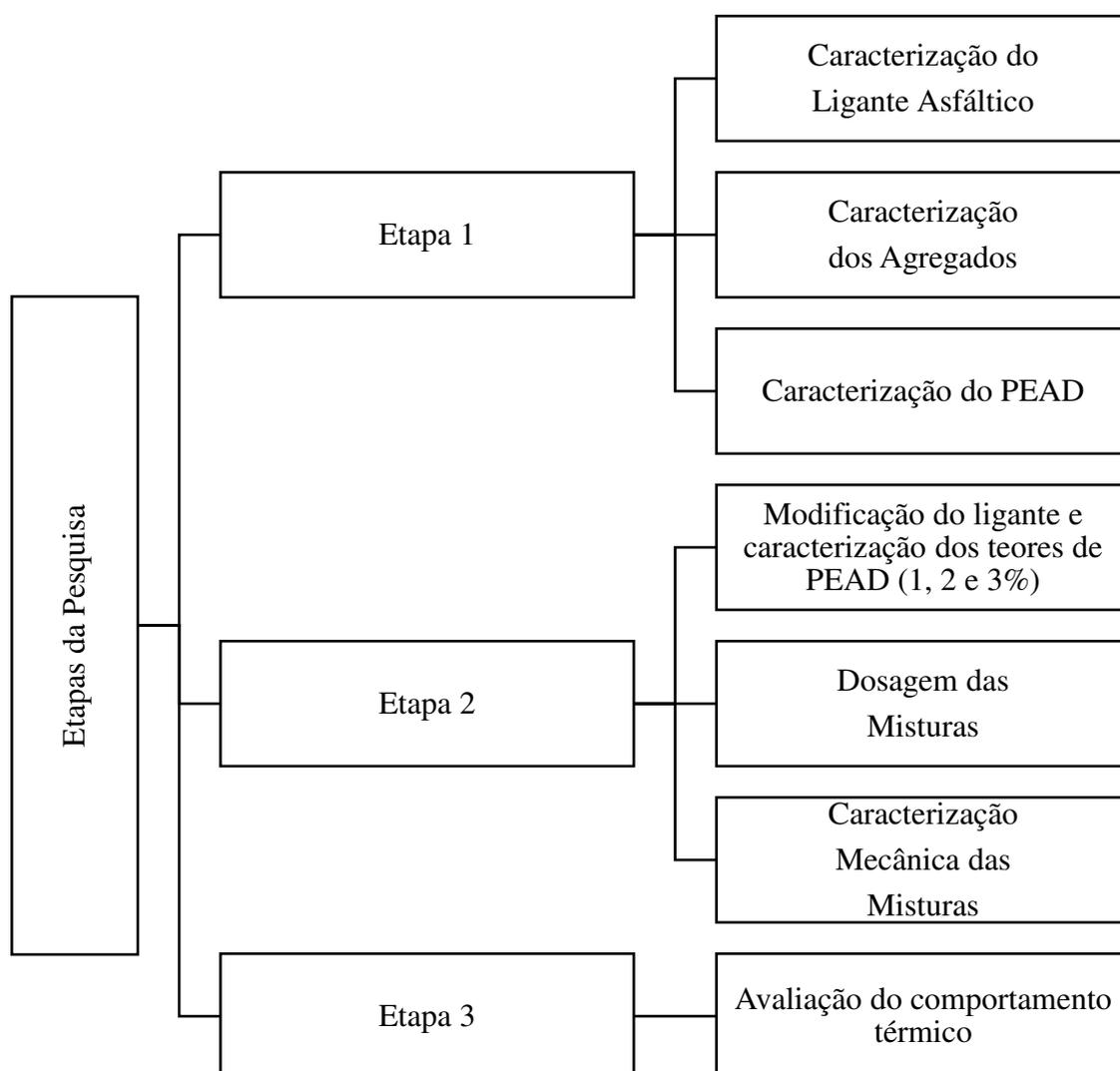
Ao longo deste capítulo, mostrou-se o aumento desenfreado da população nas grandes cidades e a constante substituição do terreno natural por materiais artificiais tem levado ao aparecimento de um fenômeno denominado de Ilha de Calor Urbana, o qual se traduz no incremento das temperaturas das áreas urbanas. Preconiza-se, portanto, como uma das melhores opções para combater este fenômeno a utilização de métodos que visem aumentar a refletância solar dos revestimentos urbanos. Nesse caso, a utilização de meios que forneçam cores mais claras aos pavimentos asfálticos diminuindo a absorção de calor nos pavimentos tem se mostrado uma alternativa bastante eficaz.

Evidenciou-se ainda que a modificação de ligantes tem o potencial de prolongar a vida de serviço do pavimento, melhorando suas propriedades. Portanto, a ideia de misturar PEAD aos ligantes pode ser um processo promissor, associado a disposição deste na superfície, para gerar ganhos socioambientais e reduções no índice albedo promovendo diminuição de temperaturas em centros urbanos, além de absorver menos calor, a pavimentação com ligante asfáltico colorido é ideal para ser aplicada em vias especiais que necessitem de maior visibilidade e diferenciação de piso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa consiste na avaliação das propriedades mecânicas e térmicas de misturas asfálticas modificadas com PEAD. Os corpos de prova (CPs) foram moldados seguindo os critérios da metodologia SUPERPAVE. Conforme o fluxograma apresentado na Figura 15, a metodologia utilizada no presente trabalho está dividida em três etapas. Sendo essas: caracterização física dos materiais, caracterização mecânica da mistura asfáltica e Caracterização do comportamento térmico.

Figura 15 – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa

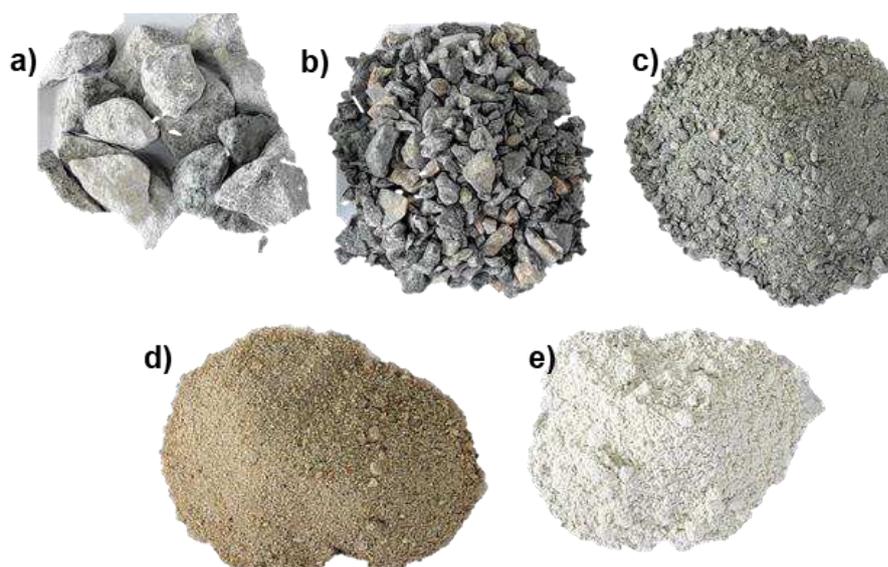


3.1. MATERIAIS

3.1.1. Agregados

Os agregados graúdos utilizados para compor as misturas asfálticas foram as britas graníticas de diâmetros nominais máximos 19mm e 12,5mm. Os agregados miúdos utilizados foram o pó de pedra, também de natureza granítica, e a areia de leito de rio. A cal hidratada foi usada como fíler. Os agregados graúdos e o pó de pedra foram cedidos pela empresa Rocha Cavalcante, enquanto a areia e o fíler foram adquiridos no comércio local. A Figura 16 mostra os agregados e fíler utilizados nesta pesquisa.

Figura 16 – Agregados para esta pesquisa: a) Brita 19mm; b) Brita 12,5mm; c) Pó de pedra e d) Areia e e) Cal.



3.1.2. Ligantes asfálticos

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dois tipos de ligantes, sendo o principal do Tipo CAP 50/70 e secundariamente somente para ensaios de aderência e desgaste o CAP modificado do tipo AMP 55/75.

3.1.2.1. CAP 50/70

O ligante asfáltico, como visto na Figura 17, utilizado nesta pesquisa é o CAP 50/70, devido ser este o mais utilizado na região Nordeste. Foi fornecido pela empresa Cordilheiras Pavimentação Ltda da cidade de Campina Grande-PB.

3.1.2.2. AMP 55/75

Para atingir os objetivos desta pesquisa foi obtido também o ligante asfáltico do tipo AMP 55/75 devido sua possível melhoria em aderência ao PEAD. Foi fornecido pela empresa Insttate Engenharia Ltda da cidade de Recife-PE.

Vale salientar que a inclusão deste AMP nesta pesquisa foi unicamente para verificação de aderência da camada de PEAD na superfície de misturas com AMP, considerando uma melhor aderência dessas misturas, pois as temperaturas de usinagem e compactação de AMPs são mais elevadas em relação aos CAP 50/70. Assim como o intuito desta pesquisa não é propor o uso do AMP e sim verificar a influência da temperatura mais elevada na aderência do PEAD, logo não foi necessária a caracterização do AMP 55/75, que somente foi avaliado no que tange a relação viscosidade e temperatura, para obtenção das corretas temperaturas de usinagem e compactação.

3.1.3. Polietileno de alta densidade (PEAD)

O polietileno de alta densidade (PEAD), observar Figura 17, utilizado nesta pesquisa, foi obtido de resíduos domésticos de Campina Grande.

Figura 17- PEAD encontrados nos resíduos domiciliares



3.2. MÉTODOS

3.2.1. Caracterização dos agregados

Os agregados representam a maior parte das misturas asfálticas, deste modo sua seleção adequada tem importância fundamental na vida útil dos pavimentos., uma vez que seu desempenho será melhor quanto melhor for a combinação do agregado com o ligante asfáltico para formar a mistura asfáltica utilizada, por isso, é importante que os agregados possuam propriedades mecânicas e físicas adequadas para garantir o correto desempenho das misturas asfálticas em campo.

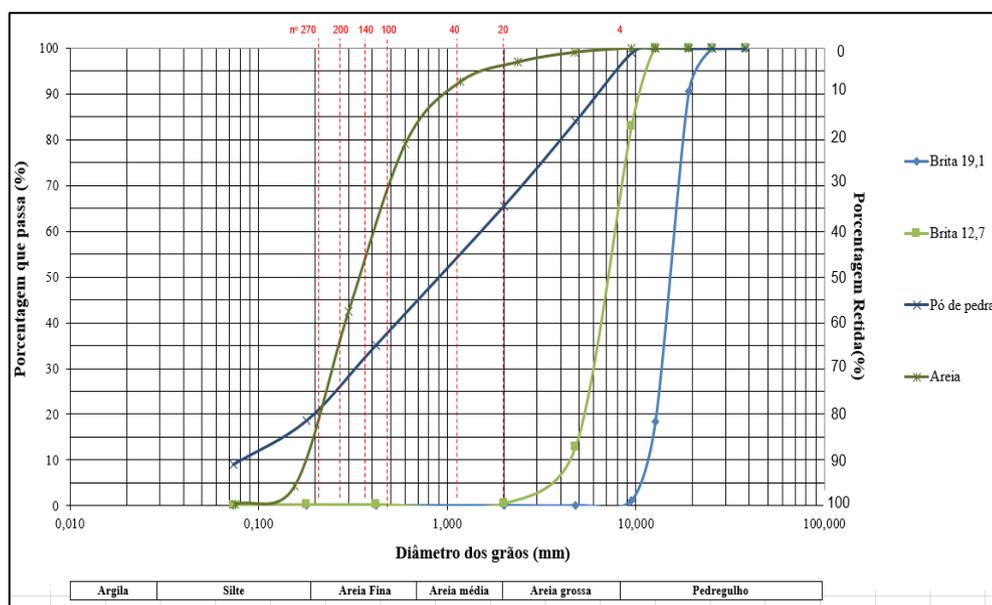
Assim, a caracterização dos agregados desta pesquisa foi realizada por meio dos procedimentos de análise granulométrica, massa específica e absorção do agregado graúdo e miúdo abrasão Los Angeles , índice de forma , equivalente areia, partículas fraturadas) e partículas planas e alongadas. Conforme legislação vigente descrita na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaios para caracterização dos Agregados

Ensaio	Norma
Análise Granulométrica (%)	ASTM C136: 2019
Massa específica (g/cm ³)	ASTM C127: 2015
Absorção (%)	ASTM C127: 2015
Abrasão “Los Angeles” (%)	ASTM C131: 2020
Índice de Forma	ASTM D4791: 2019
Partículas alongadas e achatadas (%)	ASTM D4791: 2019
Partículas fraturadas (%)	ASTM D5821: 2017
Equivalente Areia (%)	ASTM D2419: 2014
Angularidade (%)	ASTM C1252: 2017

A distribuição granulométrica dos agregados, muito importante no comportamento dos revestimentos asfálticos, é determinada por análise por peneiramento, sendo expressa como porcentagem em massa em cada tamanho de malha de peneira, representada na Figura 18.

Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados



Quanto à distribuição granulométrica dos grãos, os agregados graúdos e a areia apresentam graduação uniforme, em que possui a maioria de suas partículas com tamanhos concentrados em uma faixa estreita, com curva granulométrica íngreme, enquanto o pó de pedra

possui graduação densa, que é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua em todos os tamanhos de grãos, próxima à de densidade máxima.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos procedimentos de caracterização dos agregados, em que todos os parâmetros analisados se encontram dentro dos limites recomendados.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Especificação	Resultados			
		Brita 19mm	Brita 12,5mm	Pó de Pedra	Areia
Massa específica real (g/cm ³)	-	2,759	2,624	2,544	2,665
Massa específica aparente (g/cm ³)	-	2,732	2,611	2,429	2,607
Absorção (%)	≤2	0,360	0,52	0,66	0,835
Abrasão Los Angeles (%)	≤55	20,22	21,26	-	-
Índice de forma	≥0,5	0,678	0,665	-	-
Partículas achatadas e alongadas (%)	≤10	8,44	8,74	-	-
Partículas fraturadas (%)	≥90	99,78	99,81	-	-
Equivalente areia %	≥55	-	-	74,39	76,26
Angularidade, %	≥45	-	-	45,04	55,35

3.2.2. Caracterização dos ligantes asfálticos

A Tabela 5 apresenta os procedimentos e respectivas normas usadas para avaliar as características físicas e reológicas do ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa. Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e PG foram realizados com amostras de ligante asfáltico virgem e envelhecidas pelo procedimento de envelhecimento à curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (Rolling Thin Oven Test). Os ensaios de viscosidade rotacional foram realizados usando um viscosímetro rotacional da marca Brookfield e o ensaios de reologia, em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1).

Tabela 5 – Ensaio para caracterização dos Ligantes Asfálticos

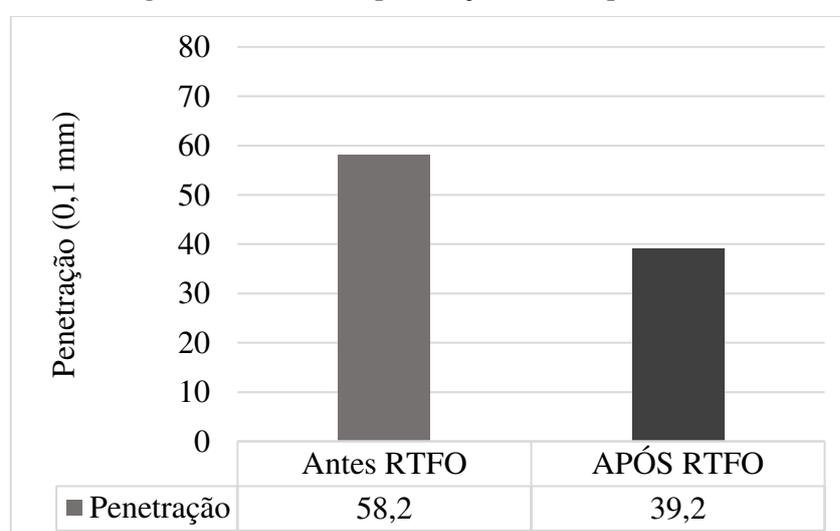
Ensaio	Norma
Penetração 0.1 mm (100g, 5s a 25°C)	ASTM D5/D5M: 2020
Ponto de amolecimento (°C)	ASTM D36/D36M: 2020
Viscosidade Rotacional (cP)	ASTM D4402/D4402M: 2015
Performance Graded – PG (°C)	ASTM D6373: 2021
Rolling Thin Film Oven- RTFO (g)	ASTM D2872: 2019
Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	AASHTO M320: 2016

3.2.2.1. Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração trata-se de um ensaio para estudo de consistência do ligante asfáltico. Na execução do experimento foi medida a profundidade, em décimos de milímetro que uma agulha de massa padronizada (100 g) penetrou verticalmente na amostra de ligante com volume padronizado, durante 5 segundos, à temperatura de 25°C. Quanto maior a consistência do ligante menor a penetração da agulha padrão.

Os resultados do ensaio de penetração das amostras do CAP 50/70 antes e após o envelhecimento estão ilustrados na Figura 19, os resultados são uma média de 5 penetrações em pontos da superfície da amostra, distantes entre si e da borda do recipiente em 10 mm.

Figura 19 – Ensaio de penetração antes e após o RTFO



O resultado para o CAP 50/70 antes de procedimento em estufa RTFO encontra-se dentro do especificado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), segundo resolução n° 19/2005. Após o processo de envelhecimento à curto prazo nota-se uma diminuição do valor da penetração, isto ocorre devido a oxidação existente no procedimento.

Por meio da relação percentual entre os resultados de penetração das amostras envelhecidas e virgens, foi possível calcular a penetração retida (PENretida), de acordo com a Equação 2. Esse parâmetro reflete a sensibilidade do material ao envelhecimento.

Equação 2:

$$PENretida(\%) = \frac{(PENpós RTFO)}{(PENantes RTFO)} \times 100$$

Para o CAP em estudo obteve-se uma penetração retida de 67,35%, de acordo com a legislação vigente a penetração retida deve ser no mínimo 55%, contudo quanto mais próximo de 100% menor será a susceptibilidade do ligante ao envelhecimento, logo maior será a sua resistência a oxidação.

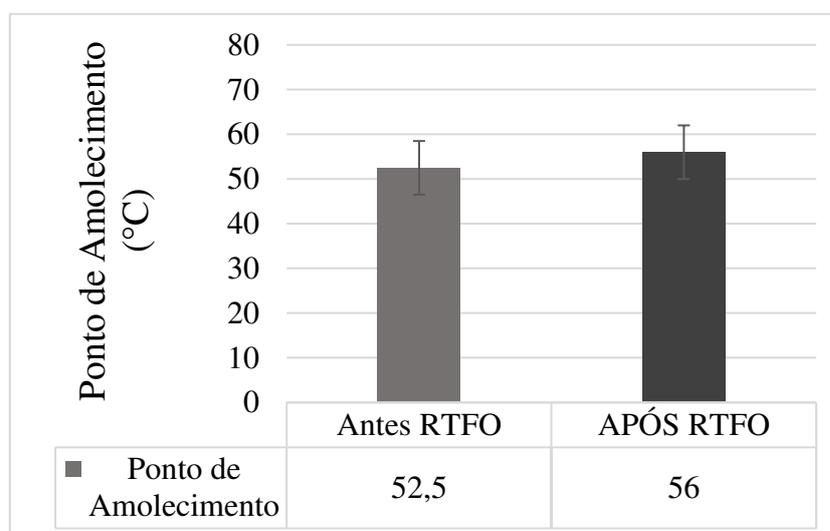
3.2.2.2. *Ensaio de Ponto de Amolecimento*

O ensaio de ponto de amolecimento, também chamado de anel e bola é utilizado na definição do ponto de fusão de ligantes asfálticos, trata-se de uma medida empírica que relaciona a temperatura na qual o ligante amolece quando aquecido, sob certas condições particulares, e atinge uma determinada condição de escoamento. Neste o ligante é submetido a um aquecimento gradual em banho de água a uma taxa de 5°C/minuto. Duas amostras de ligante são colocadas no béquer em anéis padronizados sob carga de duas bolas de aço com dimensões e peso também padronizadas. Tem-se uma placa de referência alocada próxima ao fundo do béquer, para quando o ligante começar a escoar as esferas toquem esta placa. Neste momento são documentadas as temperaturas do ensaio, que não podem diferir mais que 1°C entre as duas amostras ensaiadas. O ponto de amolecimento foi, então, a média das temperaturas lidas no termômetro e foi determinado para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo. Este ensaio e a penetração possuem uma relação inversamente proporcionais, pois quando o ligante apresenta elevação do ponto de amolecimento conseqüentemente deve apresentar menor

penetração da agulha padrão. Dessa maneira são classificados como ensaios que medem a consistência dos ligantes asfálticos.

O parâmetro do ponto de amolecimento representa indiretamente a conservação das propriedades do ligante a altas temperaturas e o possível aumento da resistência à deformação permanente. Os resultados das amostras ensaiadas antes e após envelhecimento a curto prazo (RTFO) estão apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Ponto de amolecimento antes e após envelhecimento em RTFO.



Um outro parâmetro que indica a susceptibilidade do ligante asfáltico ao envelhecimento é a variação no ponto de amolecimento, que consiste na subtração entre o ponto de amolecimento da amostra envelhecida e o ponto de amolecimento da amostra virgem.

Após o processo de envelhecimento em estufa RTFO a variação no ponto de amolecimento não deve ser superior a 8°C levando em consideração o ligante antes do procedimento de envelhecimento. Logo verifica-se que o ligante em questão se encontra conforme o especificado com uma variação do ponto de amolecimento do CAP 50/70 de 3,5°C.

3.2.2.3. Viscosidade Rotacional

Este ensaio permite determinar a consistência do CAP mediante resistência ao escoamento. Essa viscosidade está relacionada ao bombeamento e transporte do CAP, assim como à usinagem e compactação de uma mistura asfáltica. A execução do ensaio, constitui na disposição de um cilindro com ranhuras padronizadas (spindle) dentro de uma cubeta com 8 gramas de ligante. Neste trabalho utilizou-se um viscosímetro Brookfield, modelo DV-III ULTRA, ligado a um controlador de temperatura conforme mostra a Figura 25, com spindle nº 21 para CAP não modificado, spindle nº 27 para CAP's modificados, Logo em seguida, foi efetuado um torque com uma haste interligada ao cilindro. O ligante foi então aquecido em temperaturas pré-estabelecidas por norma, de 135°C, 150°C e 177°C, a 20, 50 e 100 rpm, respectivamente. Os valores das viscosidades foram medidos antes e após o envelhecimento, conforme ilustrado na tabela 6.

Tabela 6 – Viscosidades dos ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75

Viscosidade Rotacional	CAP 50/70		AMP 55/75	
	Antes RTFO	Após RTFO	Antes RTFO	Após RTFO
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	401	557.50	1065	1223
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, cP	198	269	489,5	589
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	72.75	94	174	195

De acordo com a metodologia SUPERPAVE a melhor viscosidade para determinada mistura deve conceder ao ligante asfáltico a capacidade de envolver todos os agregados.

Gama (2016) justifica que viscosidades muito baixas podem provocar escorregamento da mistura asfáltica quando compactada pela ação dos rolos compactadores. Dessa maneira, se faz necessário definir as Temperaturas de Usinagem – TU e Temperaturas de Compactação – TC ideais que variam conforme o tipo de ligante utilizado. As TU's e TC's foram calculadas por um método tradicional que determina uma TU na qual o ligante tenha uma viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e uma TC na qual apresenta viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Os valores das TU's e TC's estão disponibilizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Temperaturas de Usinagem e Compactação dos ligantes asfálticos.

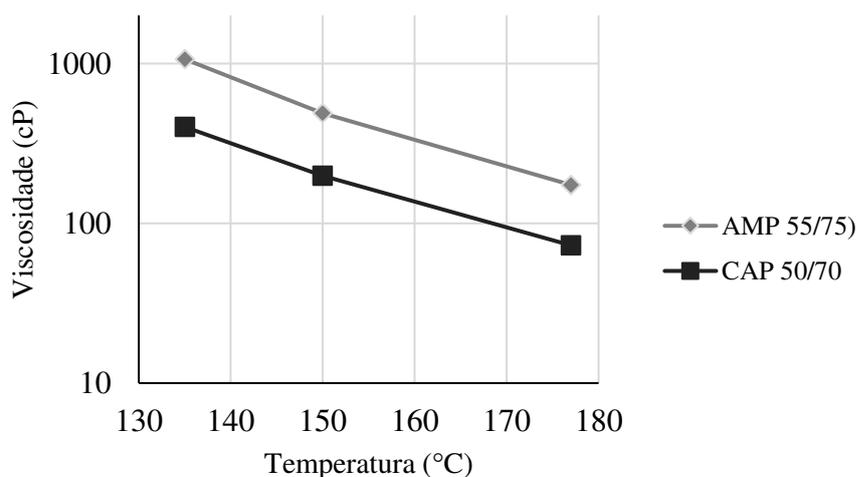
Temperaturas de Usinagem e Compactação						
	Usinagem (°C)			Compactação (°C)		
	T ₁	T ₂	T _{média}	T ₁	T ₂	T _{média}
CAP 50/70	151	157	154	141	145	143
AMP 55/75	175	177	176	162	167	165

Sabe-se a partir da Tabela 7 que os CPs foram compactados com temperaturas diferentes em função do tipo de mistura estudada. Sendo esta 143°C para o ligante puro do tipo 50/70 e 165°C para o ligante modificado do tipo AMP 55/75.

Para ligantes asfálticos modificados, a legislação do DNIT - ME 385/1999 estabelece que, a temperatura máxima de aquecimento não deve ser superior a 180°C, porém apesar dessa resolução não ser específica para o material incorporado como é o caso do PEAD, optou-se por tomá-la como base para uma comparação dos resultados. Dessa maneira, os valores foram inferiores a essa temperatura de 180°C sugerida.

De acordo com o REPORT 648 (NCHRP, 2010), as temperaturas apropriadas para usinagem e compactação da mistura asfáltica são aquelas nas quais o ligante asfáltico apresenta viscosidades de 170 ± 20 cP e 280 ± 30 cP, respectivamente. A partir das viscosidades obtidas pelo ensaio de viscosidade rotacional à 135 °C, 150°C e 177°C plotadas em um diagrama com o eixo y em escala logarítmica, traçou-se a linha de tendência exponencial do comportamento viscosidade versus temperatura do ligante asfáltico estudado (Figura 35). Por meio da equação da linha de tendência foi possível obter as temperaturas médias de usinagem e compactação, sendo estas 154 °C e 143 °C, respectivamente, para o ligante do tipo CAP 50/70 e 176 °C e 165 °C, respectivamente, para o ligante do tipo AMP 55/75, Figura 21.

Figura 21 – Curva viscosidade versus temperatura dos ligantes CAP 50/70 e AMP 55/75



3.2.2.4. Rolling Thin Film Oven (RTFO)

Este ensaio RTFO, também chamado ensaio de envelhecimento em estufa de filme fino rotativo, é um procedimento adotado mundialmente para a simulação do envelhecimento a curto prazo de ligantes asfálticos.

A simulação do envelhecimento a curto prazo foi efetuada por meio da utilização da RTFO. Neste caso, amostras de CAP são submetidas ao envelhecimento mediante calor (temperatura de ensaio de 163°C) e ar (ar comprimido injetado) durante um período pré-determinado de tempo (85 minutos). Assim, é possível simular em laboratório a oxidação e evaporação experimentada pelo CAP durante a usinagem, espalhamento e compactação de uma mistura asfáltica.

Após finalizado o procedimento foi verificada a variação de massa que o ligante sofreu utilizando a Equação 3. As amostras envelhecidas foram novamente caracterizadas por meio dos ensaios empíricos e reológicos.

Equação 3

$$\Delta M = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \times 100$$

Em que: ΔM = variação em massa (%), $M_{inicial}$ = massa do CAP antes do RTFO (g) e M_{final} = massa do CAP após o RTFO (g).

Para o CAP em estudo obteve-se uma variação em massa de 0,076, que atende ao requisito de $\Delta M \leq 0,5$.

A partir dos resultados de penetração e de ponto de amolecimento, foi possível calcular o índice de suscetibilidade térmica (ISC) (Equação 4). Esse parâmetro indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura.

Equação 4

$$ISC = \frac{(500)(\log PEN + (20)(T^{\circ}C) - 1951)}{120 - (50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)}$$

Onde:

$T^{\circ}C$ = Ponto de amolecimento, PEN = Penetração a 25°, 100g.5seg

Para esta pesquisa o índice de suscetibilidade térmica a 60°C de CAP 50/70 foi de -0,22. A resolução da ANP (2005) define uma faixa para o enquadramento dos valores de IST, variando de -1,5 a +0,7.

3.2.2.5. Performance Grade (PG)

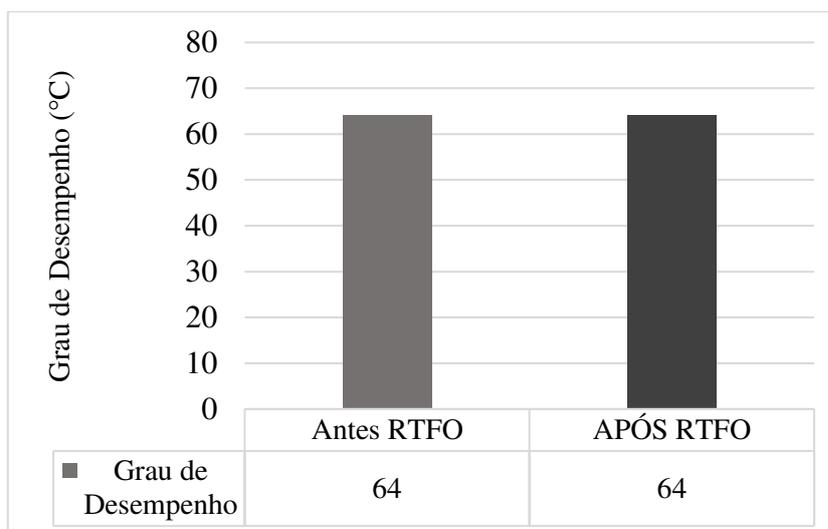
Este ensaio de grau de desempenho mede a faixa de variação de temperaturas em que o ligante asfáltico pode ser utilizado, mantendo suas características, baseado no nível de rigidez das amostras nas temperaturas. Esse critério serve também para indicar que os ligantes asfálticos modificados são mais rígidos do que seus ligantes asfálticos de base. A execução do ensaio é feita pelo reômetro DSR, Figura 22, e o operador só necessita iniciar o programa e colocar a amostra no equipamento.

Figura 22 – Reômetro DSR

A realização deste ensaio fundamenta-se na variação de temperatura iniciando em 46 °C com degraus de 6°C, analisando que para cada degrau o parâmetro $G^*/\sin\delta$ não deve ter valores menores que 1,00 kPa para ligantes que não sofreram o processo de envelhecimento à curto prazo e para os ligantes envelhecidos que passaram pela simulação em estufa RTFO não devem possuir valores menores que 2,20 kPa. Ao alcançar esses limites impostos pela norma para o parâmetro $G^*/\sin\delta$ o ensaio é finalizado. As amostras utilizadas nesse teste foram de ligantes asfálticos puro e modificados, bem como antes e após o processo de envelhecimento, e possuíam 25 mm de diâmetro com 1 mm de espessura. As amostras envelhecidas em RTFO e ensaiadas no teste de grau de desempenho podem ser analisadas segundo o índice de envelhecimento (AI) que utiliza o parâmetro $G^*/\sin\delta$ antes e após o procedimento de envelhecimento para avaliação do comportamento do ligante. Conforme Asukar et al. (2016) o índice de envelhecimento é importante por mostrar a suscetibilidade do material ao envelhecimento e o desenvolvimento da rigidez do material em diferentes períodos da vida de serviço do pavimento.

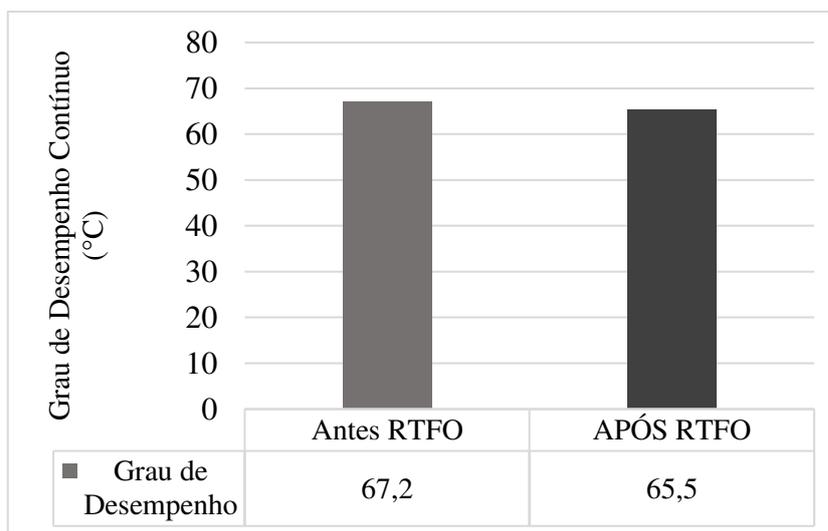
O ensaio de PG foi realizado verificando-se o parâmetro $G^*/\sin\delta$ conforme a variação de temperatura, partindo de 46°C, com incrementos de 6°C. O valor do o PG é dado pela temperatura anterior à da falha verificada no ensaio, figura 23.

Figura 23 – Grau de desempenho para o ligante puro



Este ensaio também fornece a temperatura de falha dos ligantes, definida como a temperatura na qual o parâmetro $G^*/\sin\delta$ atinge um valor menor que 1,0 kPa antes do processo de envelhecimento a curto prazo e um valor de 2,2 kPa após esse processo, segundo a especificação SUPERPAVE. Os valores obtidos da estimativa de falha são apresentados na Figura 24.

Figura 24 – Estimativa de temperatura de falha para o ligante puro



A partir do resultado desse ensaio com amostras do ligante asfáltico virgem e envelhecidas à curto prazo, pôde-se calcular o índice de envelhecimento (AI), o qual relaciona

o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ do ligante asfáltico antes e após o envelhecimento à uma temperatura, conforme a Equação 5.

Equação 5

$$AI = \frac{(G^*/\text{Sen}\delta \text{ pós RTFO})}{(G^*/\text{Sen}\delta \text{ antes RTFO})}$$

Para o CAP 50/70 o índice de envelhecimento calculado corresponde a 1,72. O Índice de Envelhecimento, dá uma ideia sobre o grau de envelhecimento induzido ao ligante, pois quanto maior seu valor, maior será o grau de envelhecimento.

3.2.2.6. *Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)*

O ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas, também realizado no reômetro DSR tem o objetivo de verificar o comportamento do ligante asfáltico em seu regime elástico sob tensões repetitivas, o que simula condições de tráfego padronizadas. O MSCR foi realizado na menor temperatura de PG verificada entre a amostra de ligante virgem e após RTFOT. As amostras usadas são de ligante asfáltico envelhecidas pelo RTFOT. Durante o ensaio são aplicados 20 ciclos de tensão ao ligante asfáltico, sendo os 10 primeiros ciclos sob a tensão de 0,1 kPa e os demais sob a tensão de 3,2 kPa. A partir dos resultados da deformação das amostras devido às tensões, são calculados as compliâncias não recuperáveis (J_{nr}), conforme Equação 6, a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis de 0,1 kPa e 3,2 kPa ($J_{nr,diff}$), conforme Equação 7, e porcentagem de recuperação elástica (%R), conforme Equação 8.

Equação 6

$$Jnr = \frac{\varepsilon_{nr}}{\sigma}$$

Em que:

Jnr: compliâncias não recuperáveis em porcentagem; ε_{nr} : Deformação não recuperável;

σ : Tensão aplicada.

Equação 7

$$Jnr_{diff} = \frac{Jnr3200 - Jnr100}{Jnr100} \times 100$$

Em que:

Jnr_{diff}: diferença percentual entre as compliâncias, em porcentagem; Jnr3200: compliância não-recuperável a 3.200Pa; Jnr100: compliância não-recuperável a 100Pa.

Equação 8

$$R = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_T} \times 100$$

3.2.2.7. *Resultados dos procedimentos descritos no tópico*

A Tabela 8 apresenta os resultados dos procedimentos ao longo deste tópico. Nesta são também apresentadas as especificações recomendadas pela especificação de serviço DNIT 095/2006 para cimentos asfálticos de petróleo do tipo 50/70 e as recomendações da AASHTO M320 (2016) para os resultados de MSCR.

Os resultados demonstram que o ligante asfáltico estudado é adequado para serviços de pavimentação, tendo em vista que todas as características analisadas se encontram dentro dos critérios estabelecidos para o CAP 50/70 pelo DNIT 095/2006. Pode-se afirmar também que o ligante asfáltico estudado é classificado como PG 64-XX.]

Tabela 8 – Resumo dos ensaios de caracterização dos ligante CAP 50/70

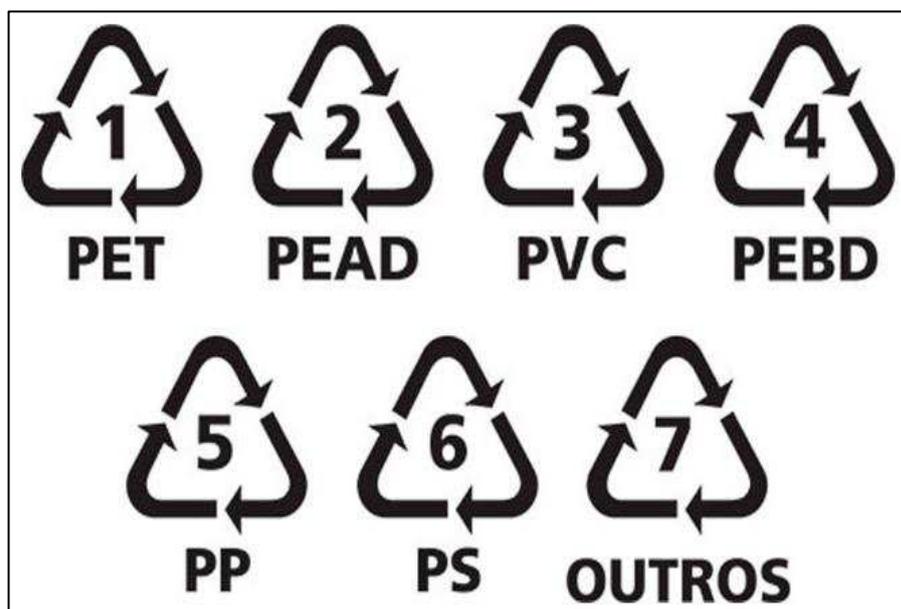
Característica	Resultado	Especificação
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	58,2	50 a 70
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm após RTFO	39,2	-
Ponto de amolecimento, °C	52,5	≥ 46
Ponto de amolecimento, °C após RTFO	56	-
Variação de massa, %	0,076	≤0,5
Temperatura mais alta do PG, °C	64	-
Temperatura mais alta do PG pós RTFO, °C	64	-
Jnr 0,1 kPa, kPa-1	3,4	-
Jnr 3,2 kPa, kPa-1	3,83	Tráfego padrão: ≤4.0
Jnr _{diff} , %	12,68	≤75
R _{0,1} , %	5,03	-
R _{3,2} , %	0,37	-
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	401	≥274
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, Cp	198	≥112
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	72.75	57 a 285
Viscosidade Rotacional a 135°C (pós RTFO) SP 21 20 rpm, cP	557.50	-
Viscosidade Rotacional a 150°C (pós RTFO) SP 21 20 rpm, cP	269	-
Viscosidade Rotacional a 177°C (pós RTFO) SP 21 20 rpm, cP	94	-
Índice de suscetibilidade térmica, °C	-0,22	-1,5 a +0,7
Penetração retida, %	67,35	≥55
Variação do ponto de amolecimento, °C	3,5	≤8
Índice de envelhecimento a 60°C	1,72	-

O ligante utilizado nesta pesquisa é indicado para rodovias de volume padrão (S) de tráfego de acordo com a AASHTO M320 (2016), a qual aponta o Jnr 3,2 kPa como um medidor da susceptibilidade à deformação permanente do ligante asfáltico, relacionando-o ao volume de tráfego suportado.

3.2.3. Caracterização do PEAD

Muitos produtos feitos de materiais plásticos apresentam um código de identificação da resina, normalmente um número de 1 a 7 dentro de um triângulo de três setas e sob o mesmo uma abreviatura, cujo objetivo é indicar o tipo particular de plástico do qual o produto é feito. Essa identificação segue a NBR 13230 (2008) e pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 – Símbolos de identificação dos materiais plásticos conforme ABNT NBR 13230.



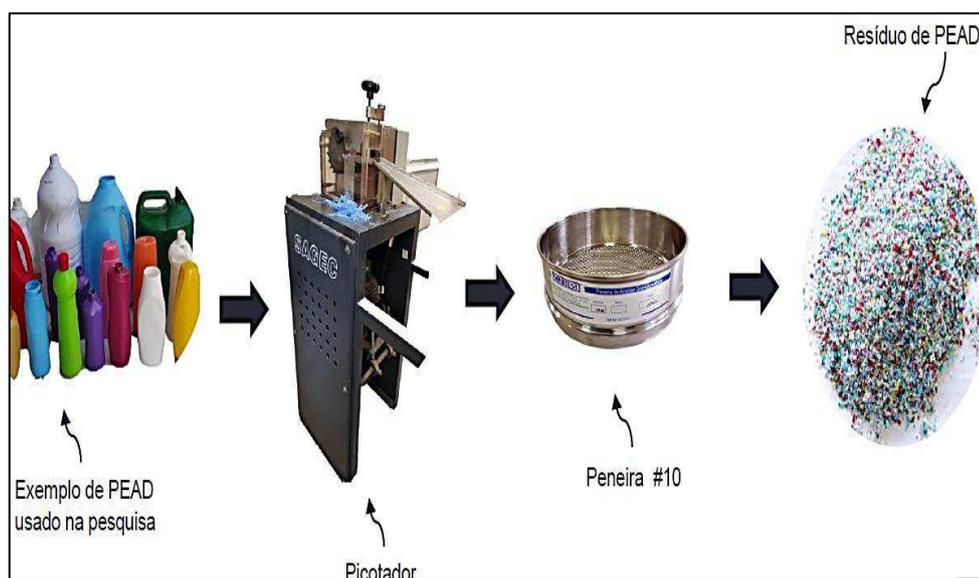
Fonte: NBR 13230 (2008)

Este código normalmente é colocado na base do recipiente ou no verso do produto. Os códigos de identificação têm por objetivo facilitar a recuperação dos recipientes plásticos descartados com o resíduo sólido urbano, uma vez que auxiliam sua separação e posterior reciclagem.

Na Figura 26, tem-se o exemplo do material recolhido e separado conforme inscrição da base, esta separação se deu no ato de recolhimento, em que somente os frascos que constam o número 2 no fundo da embalagem foram selecionados no intuito de não misturar PEAD com outros tipos de materiais plásticos.

Figura 26 – Simbologia na base de frasco de shampoo de PEAD

Conforme ilustrado na Figura 26, os materiais plásticos vêm inscrito em suas embalagens, o grupo plástico ao qual pertence, dessa forma foi realizado o processo de tratamento do PEAD utilizado neste trabalho, em que inicialmente foram recolhidos os frascos na forma de resíduos domésticos, nos próprios lixos residenciais. Esses frascos passaram por uma lavagem para retirada dos rótulos e de impurezas, em seguida com o intuito de diminuição do tamanho dos frascos de PEAD, o material foi colocado em um picotador para obtenção de tiras de PEAD e posteriormente passado por um moinho de facas, por fim foi peneirado e somente utilizado neste trabalho o material passante na peneira nº 10, conforme ilustra a Figura 27.

Figura 27 – Processo do PEAD utilizado neste trabalho

3.3. MODIFICAÇÃO DO LIGANTE CAP 50/70 COM PEAD

Para esta pesquisa foi realizada a modificação do ligante CAP 50/70, com os teores 1, 2 e 3% de PEAD triturados, com vista a posterior avaliação reológica e escolha do teor que apresenta melhores características, dentre esses, para a fabricação das misturas definitivas.

Os teores foram escolhidos conforme taxas investigadas na literatura com PEAD e outros polímeros, tais como Fontoura (2019), Manoel (2015) e Murana (2019).

Logo, a produção das misturas dos ligantes asfálticos seguiu uma metodologia baseada na literatura conforme Guimarães (2019), realizada no agitador mecânico Fisatom modelo 722, cuja descrição segue abaixo dividida em etapas:

1ª Etapa: O CAP 50/70 foi aquecido em estufa a uma temperatura de 150°C durante 30 minutos, de forma que o material obtivesse uma consistência fluida.

2ª Etapa: Se transferiu 500ml do CAP 50/70 previamente aquecido para o recipiente do misturador, e com o auxílio de um termômetro aguardou a estabilização da temperatura de ensaio (170 ± 5 °C).

3ª Etapa: O PEAD foi aquecido em estufa com uma temperatura de 50°C durante um tempo de 30 minutos, para que fosse eliminado qualquer vestígio de umidade no material, para não comprometer a mistura asfáltica.

4ª Etapa: Com o misturador mecânico em uma rotação de 555rpm adicionou-se a porcentagem de PEAD triturado (1, 2 e 3%) ao CAP 50/70, de modo a não ultrapassar 10 minutos essa fase de adição de materiais.

5ª Etapa: A mistura permaneceu sob agitação por 2h até atingir a sua homogeneidade.

6ª Etapa: Ao concluir-se o período de mistura mecânica entre CAP 50/70 e polietileno se realizou os ensaios convencionais, reológicos e mecânicos com o material produzido.

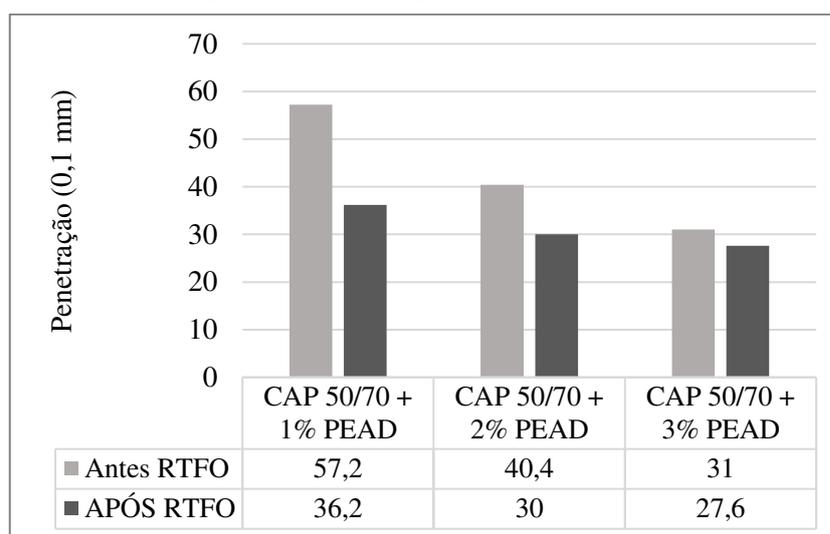
3.3.1. Caracterização dos ligantes asfálticos modificados nos teores 1,2 e 3%

Para a definição do melhor teor de PEAD para a modificação, foi realizada a caracterização reológicas dos CAPs modificados em 1,2 e 3%.

3.3.1.1. Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração, remete a consistência do ligante, ou seja, quanto maior a consistência do ligante menor a penetração da agulha. Na Figura 28, tem-se as penetrações dos ligantes modificados.

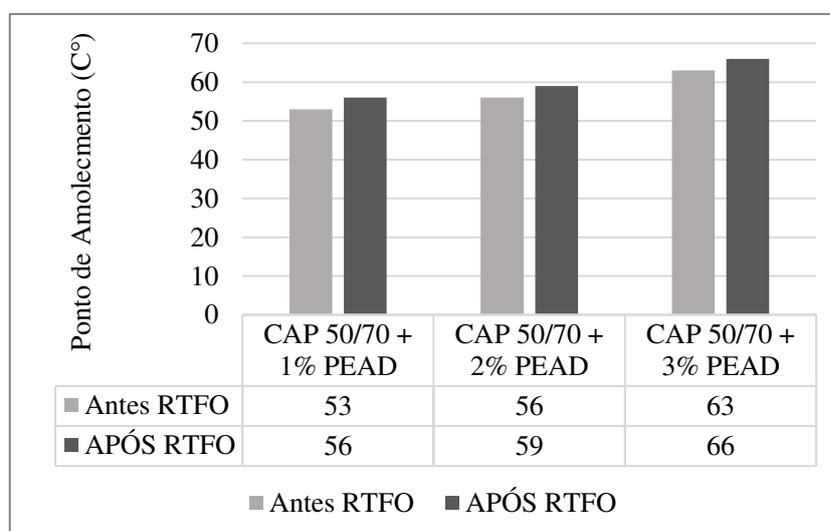
Figura 28 – Penetração dos CAPs + PEAD



3.3.1.2. Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento remete a definição de temperatura de fusão de ligantes asfálticos, na Figura 29 temos os pontos de amolecimento dos ligantes modificados.

Figura 29 – Ponto de Amolecimento dos CAPs + PEAD



3.3.1.3. Viscosidade Rotacional

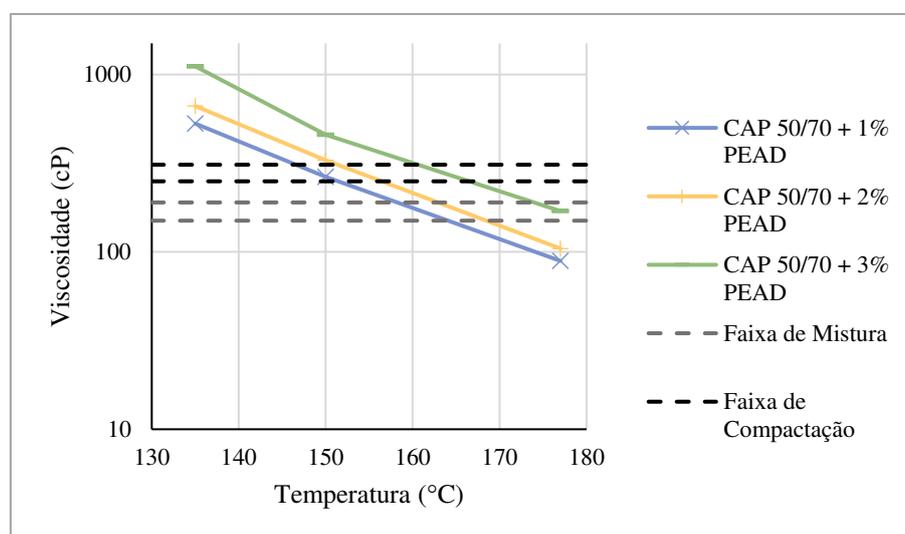
Os resultados da Tabela 9 abaixo, demonstram os valores obtidos para a caracterização do ligante asfáltico estudado modificado nos teores de 1,2 e 3% de PEAD.

Tabela 9 – Resultados das viscosidades dos ligantes CAP 50/70 modificados com PEAD

Característica	Resultado					
	1%		2%		3%	
	Antes RTFO	Após RTFO	Antes RTFO	Após RTFO	Antes RTFO	Após RTFO
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	528,7	671,2	664,1	876,5	1112,5	1055,0
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, Cp	265,5	326,0	329,1	437,5	457,5	505,5
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	89,0	108,7	104,5	144,2	170,0	162,7

A partir das viscosidades obtidas pelo ensaio de viscosidade rotacional à 135 °C, 150°C e 177°C plotadas em um diagrama com o eixo y em escala logarítmica, traçou-se a linha de tendência exponencial do comportamento viscosidade versus temperatura do ligante asfáltico estudado (Figura 30). Por meio da equação da linha de tendência foi possível obter as temperaturas médias de usinagem e compactação.

Figura 30 – Curva viscosidade versus temperatura do ligante asfáltico CAP 50/70 + PEAD



Os valores das TU's e TC's para os CAPs 50/70 modificado com PEAD estão disponibilizados na Tabela 10.

Tabela 10 – TU's e TC's para o CAP 50/70 modificado com PEAD

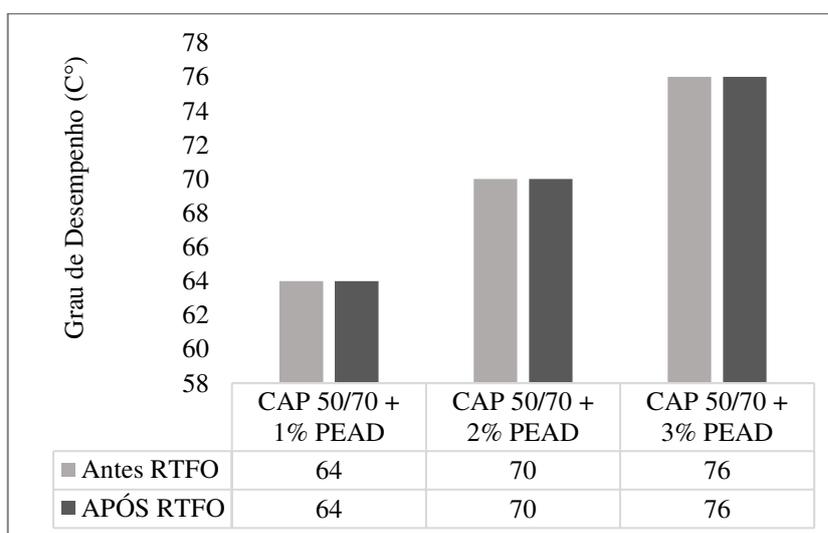
Temperaturas de Usinagem e Compactação						
	Usinagem (°C)			Compactação (°C)		
	T ₁	T ₂	T _{média}	T ₁	T ₂	T _{média}
CAP 50/70 + 1% PEAD	157	164	160,5	147	152	149,5
CAP 50/70 + 2% PEAD	163	168,5	166	152	156	154
CAP 50/70 + 3% PEAD	174	-	-	161	167	164

Sabe-se que assim como os CPs de CAP 50/70 puro e os de AMP 55/75, os CPs modificados com PEAD também obtiveram temperaturas de compactação e usinagem diferentes, todavia essas temperaturas variaram em função do tipo de mistura estudada.

3.3.1.4. Grau de Desempenho

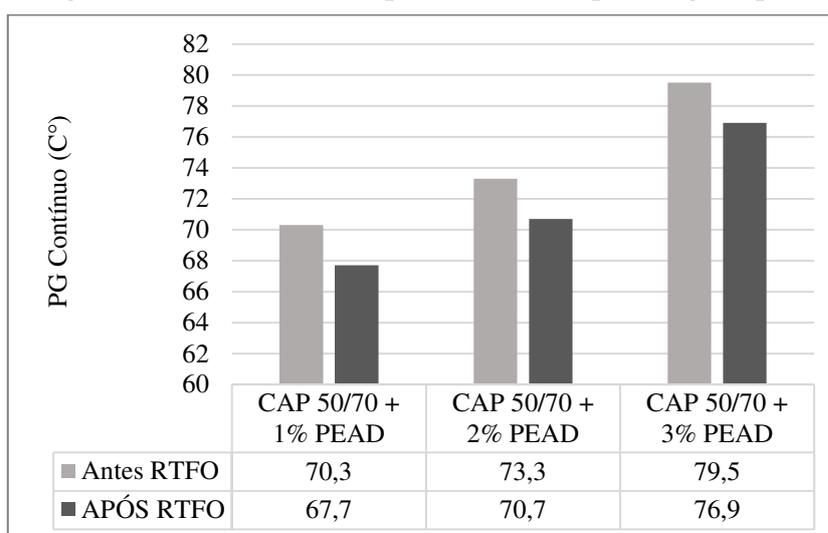
Por meio do ensaio de Performance Grade foi realizado verificando-se o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ conforme a variação de temperatura, partindo de 46°C, com incrementos de 6°C. Com PG sendo dado pela temperatura anterior à da falha verificada no ensaio, conforme Figura 38.

Figura 31 – Grau de desempenho para os ligantes modificados



O ensaio de PG também fornece a temperatura de falha dos ligantes, definida como a temperatura na qual o parâmetro $G^*/\sin\delta$ atinge um valor menor que 1,0 kPa antes do processo de envelhecimento a curto prazo e um valor de 2,2 kPa após esse dito PG contínuo. Os valores obtidos da estimativa de falha são apresentados na Figura 39.

Figura 32 – Estimativa de temperatura de falha para o ligante puro



3.3.1.5. Resultados dos procedimentos descritos neste tópico

A Tabela 12 apresenta os resultados dos procedimentos ao longo deste tópico. Nesta são também apresentadas as especificações recomendadas pela especificação de serviço DNIT 095/2006 para cimentos asfálticos de petróleo do tipo 50/70 e as recomendações da AASHTO M320 (2016) para os resultados de MSCR.

Conforme análise reológica dos ligantes modificados nos teores de 1,2 e 3% de PEAD descritos neste tópico, tem-se a Tabela 11 de resumo.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de caracterização dos ligante CAP 50/70 modificado com PEAD.

Característica	Resultado		
	1%	2%	3%
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	57,2	40,4	31
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm, pós RTFOT, °C	36,2	30	27,6
Ponto de amolecimento, °C	53	56	63
Ponto de amolecimento, °C ,pós RTFOT, °C	56	59	66
Variação de massa, %	0,39	0,1	0,15
Temperatura mais alta do PG, °C	70	70	76
Temperatura mais alta do PG pós RTFOT, °C	64	70	76
Jnr 0,1 kPa, kPa-1	2.56	4,15	4,37
Jnr 3,2 kPa, kPa-1	2.76	4,57	6,47
Jnr diff, %	7,82	10,2	48,18
R0,1, %	3	1,24	16,06
R3,2, %	0,77	0,31	0,16
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	528,75	664,1	1112,5
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 20 rpm, Cp	265,5	329,05	457,5
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 20 rpm, cP	89	104,49	170
Viscosidade Rotacional a 135°C (pós RTFOT) SP 21 20 rpm, cP	671,25	876,49	1055
Viscosidade Rotacional a 150°C (pós RTFOT) SP 21 20 rpm, cP	326	437,515	505,5
Viscosidade Rotacional a 177°C (pós RTFOT) SP 21 20 rpm, cP	108,75	144,235	162,75
Índice de suscetibilidade térmica, °C	-0,14	-0,29	1,02
Penetração retida, %	63,28	61,14	89,03
Variação do ponto de amolecimento, °C	3	3	4
Índice de envelhecimento a 60°C	1,7	1,6	1,5

Os resultados da Tabela 11 demonstram que o ligante asfáltico estudado é adequado para serviços de pavimentação, vale salientar que dada a modificação do ligante com material polimérico as especificações mudam, tornando-se um AMP. Pode-se afirmar que o ligante asfáltico estudado como melhor é o modificado com 2% de PEAD, pois comparando com a literatura deram resultados semelhantes aos dos autores como: Guimaraes (2019), que em seus estudos notou que a adição de PEAD apresentaram menor envelhecimento e maior resistência às deformações permanentes em temperaturas altas comparadas ao CAP 50/70 convencional.

Notou ainda que o aumento da viscosidade para CAP's modificados melhorou o CAP , sem prejudicar a trabalhabilidade dos CAP's modificados. Além disso, segundo o autor os CAP's mais viscosos produzem maior filme de recobrimento dos agregados e maior resistência aos efeitos do envelhecimento, com melhor teor de PEAD que apresenta viscosidade em 135°C de aproximadamente 800cP.

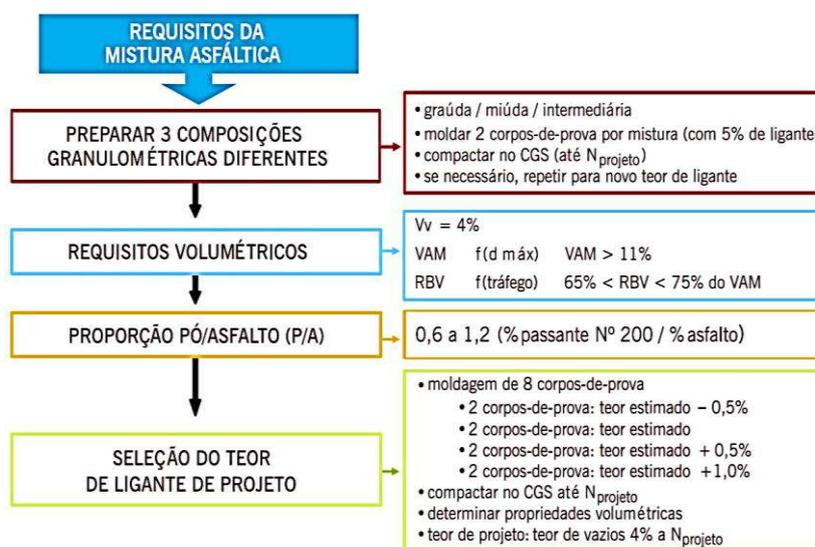
Assim como os resultados de Bringel (2017) que obteve por meio de ensaios para os teores de aproximadamente 2% a 3% que a rigidez do ligante asfáltico modificado melhora com a adição desses polímeros, para seu estudo o tipo PEAD. Já para Gama (2016) PEAD é um termoplástico , que melhora as propriedades das misturas asfálticas modificados para melhor desempenho em altas temperaturas, o mesmo afirma ainda que os valores do índice de penetração sugere que a adição de PEAD pode diminuir a sensibilidade à temperatura do ligante asfáltico.

Os autores Gibreil e Feng (2017), avaliando os efeitos do PEAD e borracha triturada nas propriedades físicas (penetração, ponto de amolecimento e ductilidade) do ligante asfáltico perceberam uma diminuição na penetração com o aumento dos teores de PEAD e borracha, sendo a penetração inferior em 42% quando foram usados 5% PEAD e 10% borracha e apresentando melhores características nestes teores, assemelhando-se com os resultados do presente estudo para o teor de 2% . Em suas conclusões, os autores indicam que a adição de PEAD e borracha triturada pode resultar em melhorias na resistência à deformação em temperaturas moderadas e altas.

3.4. DOSAGEM DAS MISTURAS PELA METODOLOGIA SUPERPAVE

Para estudar o comportamento das misturas asfálticas, escolheu-se trabalhar com um concreto asfáltico à quente. A dosagem foi realizada seguindo a metodologia SUPERPAVE, conforme Figura 33. O nível de tráfego utilizado foi o médio a alto e o tamanho máximo nominal (TMN) foi 19,0 mm, tendo em vista os materiais descritos no Tópico 3.1.1.

Figura 33 – Fluxograma da Dosagem Superpave



Fonte: BERNUCCI et al. (2008)

A primeira etapa da dosagem consistiu na escolha de três composições granulométricas distintas, que são estabelecidas pela ponderação da granulometria dos agregados em uma granulometria única. A escolha das proporções dos agregados foi feita de forma a adequar a granulometria das misturas aos requisitos da metodologia SUPERPAVE e enquadrá-las aos limites estabelecidos para faixa C do DNIT 031/2006 – ES.

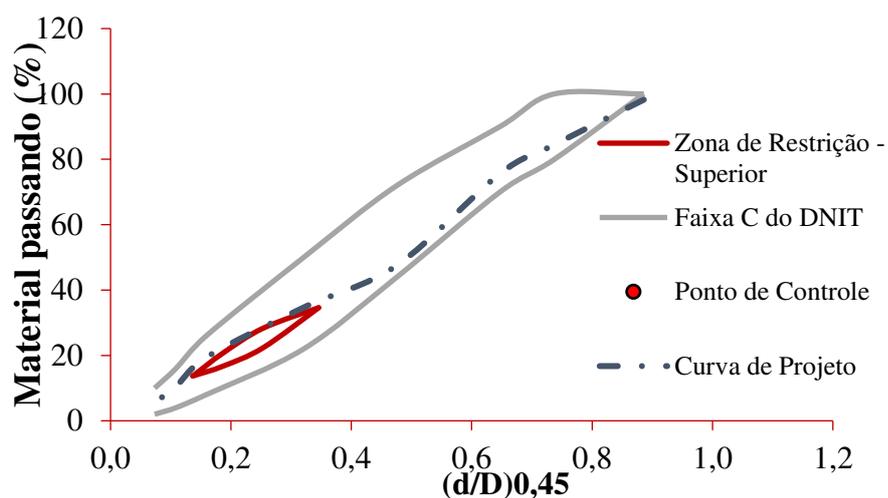
As três granulometrias da mistura dos agregados foram referidas como “curva inferior”, “curva intermediária” e “curva superior”. Elas estão apresentadas numericamente na Tabela 12.

Tabela 12 – Proporção dos agregados nas granulometrias

Curva	Brita 19,00mm	Brita 12,50mm	Pó de pedra	Areia	Fíller
Inferior	19%	30%	45%	4%	2%
Intermediária	15%	27%	51%	5%	2%
Superior	7%	25%	56%	10%	2%

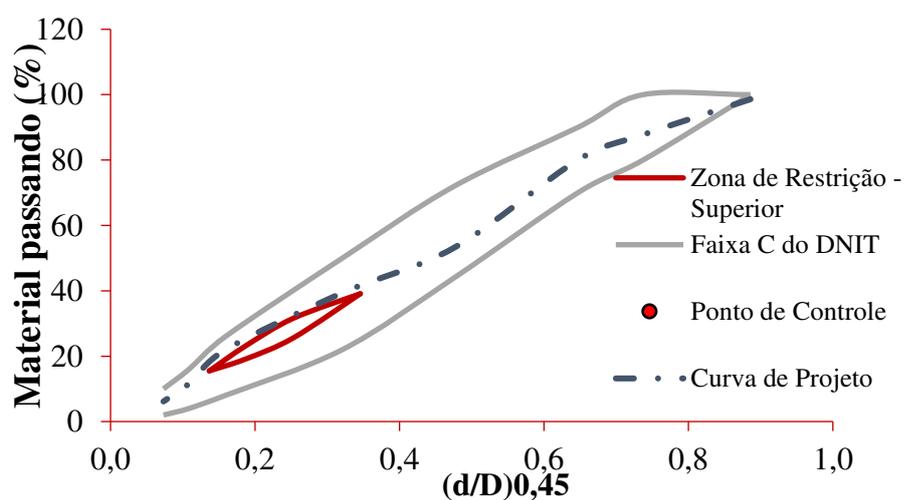
A Figura 34 exibe a curva granulométrica obtida com a proporção inferior dos agregados, em sua forma gráfica, junto com a Faixa C do DNIT para concretos asfálticos.

Figura 34 – Curva granulométrica Inferior



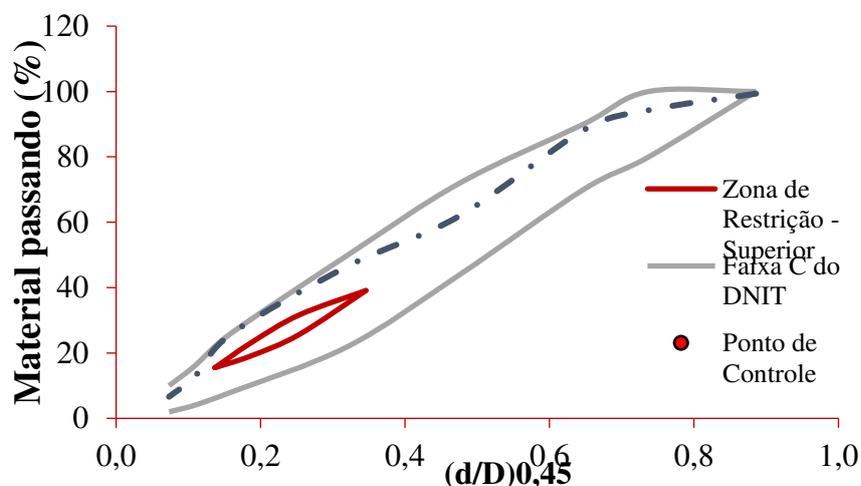
A Figura 35 exibe a curva granulométrica obtida com a proporção intermediária dos agregados.

Figura 35 – Curva granulométrica Intermediária



A Figura 36 exibe a curva granulométrica obtida com a proporção superior dos agregados.

Figura 36 – Curva granulométrica Superior



Após obter-se as três composições granulométricas adequadas aos requisitos da metodologia, prosseguiu-se para compactação dos CPs com teor de ligante inicial estipulado em 5% do peso total da mistura asfáltica, para as três composições estudadas. Os CPs foram compactados no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), seguindo a norma ASTM D6925/2015.

Nessa etapa, foram moldados dois CPs para cada curva e para cada um dos três esforços de compactação (número de giros) diferentes: $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$. Para o nível de tráfego médio a alto, esses esforços são respectivamente 8 giros, 100 giros e 160 giros. O $N_{projeto}$ foi usado para selecionar o teor de ligante de projeto, enquanto o $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ foram usados para avaliar a compatibilidade da mistura. Em seguida foram calculados os parâmetros para as três composições granulométricas estudadas e conforme os critérios a serem atendidos de acordo com o método SUPERPAVE.

Outro parâmetro analisado foi densidade máxima medida (Gmm), determinada por meio do ensaio RICE TEST, segundo a norma ASTM D 2041.

Com os corpos de prova pesados secos e submersos e de posse dos seus diâmetros e altura média é possível determinar os valores de V_v (volume de vazios), VAM (vazios no agregado mineral) e Gmm (massa específica máxima) e assim escolher a curva a ser trabalhada. Com os resultados obtidos a partir da verificação desses parâmetros volumétricos, foi possível escolher a curva intermediária, devido ser essa a curva com o volume de vazios mais próximo de 4% como demonstra a Tabela 13.

Tabela 13 – Resumo da compactação das misturas asfálticas

Misturas	% Ligante	% Gmm N _{inicial}	% Gmm N _{projeto}	% Gmm N _{máximo}	V _v (%)	VAM (%)
Inferior	5,0	92	97,4	98,1	2,75	14,95
Intermediária	5,0	89,1	97,2	97,8	4,25	15,43
Superior	5,0	88,8	96,3	96,9	4,4	15,62
Limites	-	<89,00	96,00	<98,00	4,00	>13,0

O volume de vazios obtido pela curva intermediária foi o mais próximo de 4% das três curvas, porém passando ainda 0,25 do valor estabelecido para os parâmetros volumétricos, fez-se necessário portanto encontrar um valor ainda mais próximo de 4%. Por isso, foi utilizado a equação abaixo, (Equação 9), para estimar o teor de ligante inicial igual 4,75% para a curva intermediária.

Equação 9

$$PI(\text{estimado}) = Pli - [0,4 \cdot (4 - Vv)]$$

Em que: PI(estimado) = teor de ligante estimado (%); Pli = teor de ligante inicial – tentativa (%); Vv = vazios do N_{projeto} (%).

Em seguida, foram realizadas novas compactações, com o teor de ligante inicial de 4,75%, e teores de +/- 0,5 e +1,0 e realizado novamente a medição dos parâmetros volumétricos para encontrar o teor ideal de ligante asfáltico. Assim sendo possível determinar novamente suas propriedades volumétricas por meio dos parâmetros volumétricos dos corpos de moldados com os novos teores ,conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Critérios volumétricos para cada teor de ligante

Teor de ligante(%)	% Gmm (N _{projeto})	VAM(%)	Vv(%)	RBV(%)	P/A(%)
4,25	92,13	18,68	5,87	77,66	0,87
4,75	96,95	15,47	4,05	74,46	1,15
5,25	97,69	15,38	2,31	74,22	1,1
5,75	98,91	15,63	2,09	75,05	1,01
Critérios SUPERPAVE	96	≥13,00	4,00	65 - 75	0,6-1,2

Assim, analisando os teores na curva intermediária, percebe-se que o teor de 4,75% atende os requisitos mínimos, gerando um volume de vazios muito próximo do 4%, então, adotou-se esse teor como teor de ligante de projeto. Realizou-se a compactação de mais 2 CPs dessa mistura para confirmar os parâmetros calculados, além do cálculo da relação betume-vazios (RBV) e a relação pó/ligante asfáltico (P/A) da mistura. A Tabela 15 resume os parâmetros volumétricos da mistura de projeto.

Tabela 15 – Parâmetros volumétricos das misturas com teor de ligante de projeto

Teor de ligante(%)	% Gmm (N_{projeto})	VAM(%)	V_v(%)	RBV(%)	P/A(%)
4,75	96,95	15,47	4,05	74,46	1,15
Crítérios SUPERPAVE	96	≥13,00	4,00	65 - 75	0,6 - 1,2

Para tanto, ficou definido que, a dosagem encontrada para o ligante CAP 50/70 puro, também seria utilizada para a moldagem dos corpos de prova com a adição de PEAD, no teor melhor avaliado entre 1, 2 e 3%. Assim pode-se comparar as características mecânicas do ligante puro e com a presença do polietileno para a mesma porcentagem de ligante na mistura. A compactação das misturas asfálticas foi realizada conforme a metodologia SUPERPAVE, com número de giros igual a 100.

3.5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A Tabela 16 resume as normatizações para caracterização das misturas asfálticas.

Tabela 16 – Testes para avaliação mecânica das misturas asfálticas

Ensaio	Norma
Resistência à tração por compressão diametral	ASTM C496: 2017
Dano por umidade induzida – Lottman modificado	AASHTO T 283: 2014
Módulo de resiliência	ASTM D7369: 2020
Módulo dinâmico	AASHTO T 342: 2019
Flow Number – Resistência à Deformação Permanente	ASTM D8292: 2020

3.5.1. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas asfálticas foi determinada seguindo o método de ensaio da ASTM C496: 2017. Nele, duas forças diametralmente opostas são aplicadas a um corpo de prova cilíndrico, por meio de frisos metálicos que geram tensões de tração uniformes perpendicularmente ao seu diâmetro. O carregamento estático crescente foi aplicado por meio de uma prensa mecânica, à velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s. A leitura da carga de ruptura foi feita por meio de um anel dinamométrico acoplado à prensa.

3.5.2. Módulo de resiliência

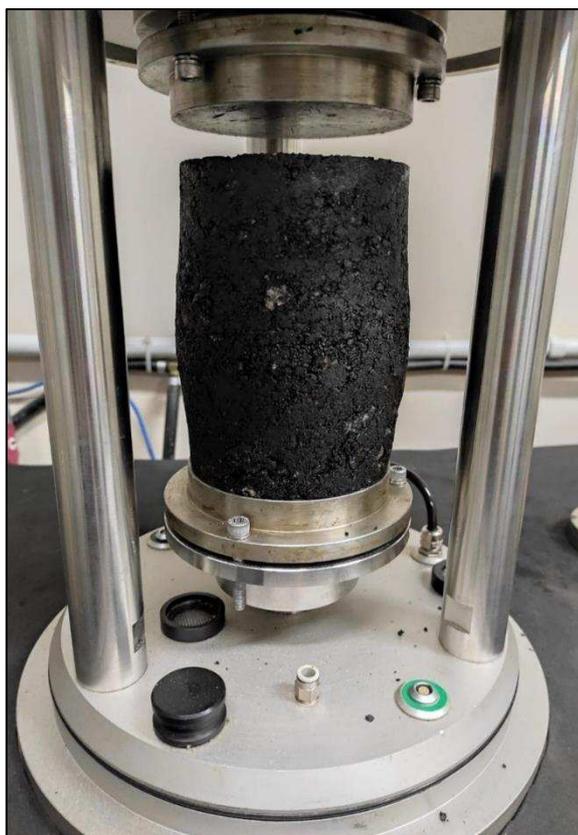
Nesta pesquisa, a rigidez das misturas asfálticas foi medida a partir do módulo de resiliência, na configuração do ensaio de compressão diametral sob carga repetida, segundo a norma ASTM D7369: 2020. Corpos de prova cilíndricos foram moldados no CGS, com medidas de 100mm de diâmetro e aproximadamente 64mm de altura. Uma carga no formato de onda haversine foi aplicada no plano diametral vertical do corpo de prova, utilizando a UTM-25. A força máxima aplicada corresponde a 10% da força observada na ruptura pelo ensaio de tração por compressão diametral. A frequência de carregamento utilizada é 1Hz, onde um ciclo corresponde a 0,10s de aplicação da carga seguido de 0,9s de repouso. A carga aplicada gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação, resultando em um deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada. Para medição do deslocamento horizontal dos corpos de prova foram utilizados dois transdutores mecânicos-eletromagnéticos tipo LVDT (Linear Variable Differential Transducer) presos ao corpo de prova por alças de referência. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de 25°C

3.5.3. Flow Number – Resistência à deformação permanente

O ensaio uniaxial de carga repetida foi realizado para medir a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas seguindo o método de ASTM D8292/2020. Neste ensaio utilizou-se corpos de prova cilíndricos, três amostras de cada grupo, com altura de aproximadamente 150mm e 100mm de diâmetro moldados no CGS, com 7% de volume de vazios. Antes do ensaio, os CPs foram aquecidos em estufa a 60°C durante três horas.

O procedimento foi realizado usando a Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) da marca IPC Global (Figura 37). Aplicou-se um carregamento uniaxial cíclico compressivo de 204kPa no formato haversine, com 0,1s de aplicação e 0,9s de repouso. O critério de parada do ensaio foi o alcance de 7.200 ciclos de carregamento (2 horas de ensaio) ou uma deformação de 50.000 microstrains, na qual as amostras invariavelmente já atingiram a ruptura.

Figura 37 – Execução do ensaio de Flow Number



3.5.4. Módulo dinâmico

O ensaio para determinação do módulo dinâmico consiste na aplicação de cargas axiais de compressão do tipo senoidal (haversine) a CP de mistura asfáltica de formato cilíndrico, em determinadas temperaturas e frequências de carregamento. A tensão aplicada e a deformação axial recuperável medida são usadas para calcular o módulo dinâmico e o ângulo de fase. Os valores de módulo dinâmico medidos em uma série de temperaturas e frequências de carregamento são ajustados numa curva mestra que caracteriza a mistura asfáltica para uso no dimensionamento de pavimentos e como critério de desempenho para a dosagem de misturas.

Para este trabalho foram realizadas as medições tanto para o CPs de referência, quanto para os CPs do ligante modificado com PEAD. Os requisitos para dimensões do corpo de prova, seguiram a legislação, respeitando a variação de altura dos CPs entre 147,5 mm e 152,5 mm, e o diâmetro médio de 98mm a 104mm.

Para a realização do ensaio realizou-se as aplicações da carga nas frequências de carregamento de 25,0; 10,0; 5,0; 1,0; 0,5 e 0,1 Hz. Nas temperaturas de 4, 20 e 40 °C. Cada corpo de prova, instrumentado com os transdutores, foi ensaiado para cada uma das combinações de temperatura e frequência de carregamento, iniciando da menor temperatura e prosseguindo para a mais alta.

3.5.5. Dano por umidade induzida – Lottman modificado

O ensaio de análise de dano por umidade induzida, também conhecido por Ensaio de Lottman Modificado, realizado conforme AASHTO T 283/2014 é utilizado para avaliar a propriedade de adesividade das misturas asfálticas medindo a sensibilidade destas à umidade considerando o efeito deletério da água, em ciclos de gelo e degelo. A resistência ao dano à umidade pode ser observada por meio da relação de resistência à tração (RRT) dada pela resistência à tração indireta das amostras condicionadas e não-condicionadas.

Para a execução deste ensaio foram moldados no CGS, dois grupos de CPs, contendo seis corpos de prova em cada grupo, esses CP's devem apresentar volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$ para esse ensaio, conforme recomenda o DNIT. Para alcançar esse volume de vazios, os CPs foram compactados aplicando-se apenas 30 giros. Cada grupo de seis CPs foi dividido em três CPs que passou por um processo de condicionamento por ciclos de gelo-degelo e três que não foram condicionados. Ambos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

3.6. CARACTERIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

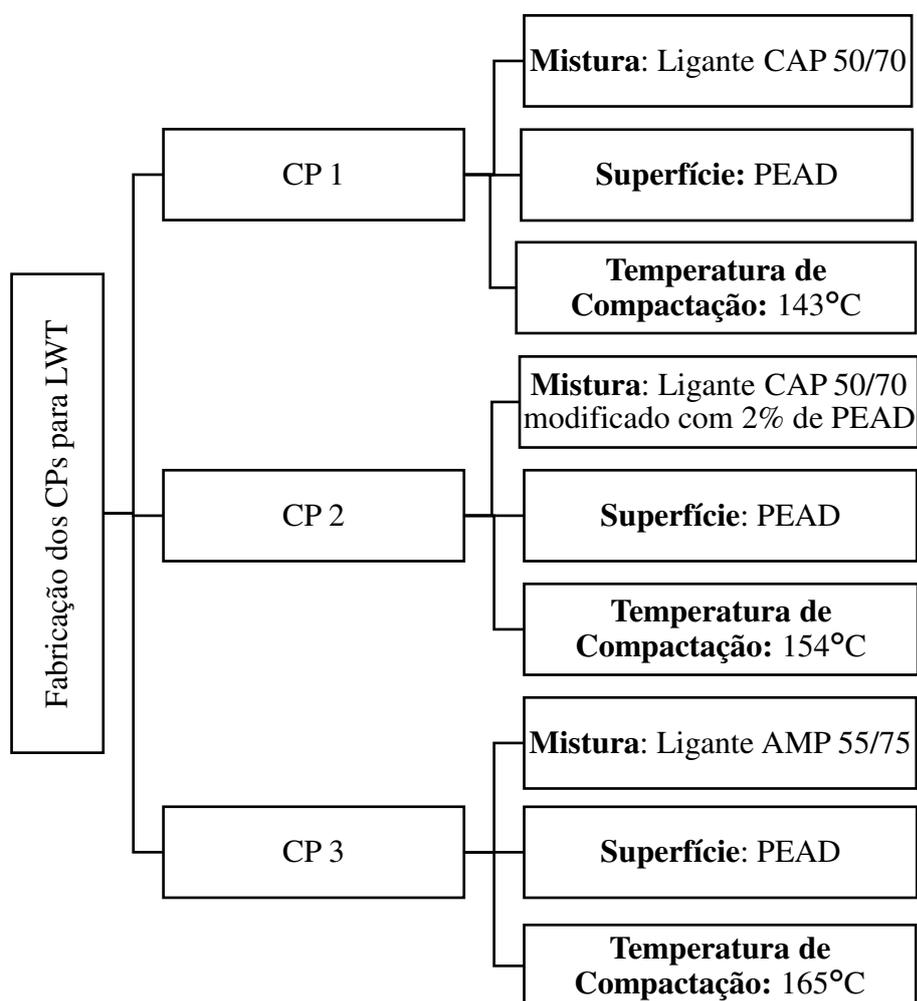
O ensaio de LWT (Loaded Wheel Test) foi adaptado da NBR 14841/2015 que trata de microrrevestimentos a frio e lama asfáltica e determinação do excesso de ligante asfáltico e adesão de areia pela máquina LWT. Essa adequação teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura de compactação em relação ao desgaste da película de PEAD no revestimento, quando submetido às solicitações da ação do tráfego simulada pelo equipamento. Na Figura 38 é apresentado o equipamento utilizado nesta pesquisa.

Figura 38 – Equipamento utilizado no LWT



Para este ensaio é fundamental o estudo das viscosidades das misturas utilizadas, uma vez que é sabido que cada mistura asfáltica tem suas temperaturas de usinagem e compactação ideais, além disso, nessa situação a temperatura pode influenciar na aderência do PEAD com a mistura, assim cada tipo de mistura foi compactada em diferentes temperaturas entre si, a depender do ligante, na Figura 39, temos os 03 CPs compactados, em que o primeiro é fabricado com o ligante do tipo CAP 50/70, o segundo com CAP 50/70 modificado com 2% de PEAD e o terceiro com ligante AMP 55/75, e todos com 30g de PEAD dispostos nas superfícies formando uma película de aproximadamente 3mm, ver Figura 39.

Figura 39 – Nomeação e composição dos CP's para LWT



Sabendo disso, os corpos de provas foram moldados seguindo a metodologia adaptada de Patrício (2015), conforme as etapas da execução do ensaio:

1ª Etapa: Medição do molde para cálculo do volume de material necessário;

2ª Etapa: Conferência do êmbolo de compactação com 50 mm de largura e 380 mm de comprimento com espessura de 20,0 mm.

Para moldagem dos corpos de prova utilizou-se a prensa MARCON MPH 10t com carga de 2tf, conforme Figura 47, seguindo os seguintes passos:

3ª Etapa: Mistura do material a ser compactado sob energia intermediária;

4ª Etapa: Colocação do material no molde sobre a base de fixação e disposição do PEAD;

5ª Etapa: Verificação da temperatura (Figura 40)

6ª Etapa: Aplicação da carga (obtida do manual do CGS, cuja tensão vertical varia de 0 a 20 kN, o que equivale a aproximadamente 2tf).

Figura 40 – Processo de compactação do corpo de prova de LWT.



Após a compactação os CPs ficaram conforme pode ser visto na Figura 41.

Figura 41 – CPs antes do procedimento de afundamento e desgaste



Em seguida, esses 03 CPs foram levados ao LWT, colocado um a um no equipamento, atentando-se ao alinhamento do eixo longitudinal do molde com da roda do equipamento, fixando-o com parafusos prisioneiros.

Posteriormente foi determinada a leitura zero com o auxílio do paquímetro de profundidade em um ponto fixo sobre o ponto central do corpo de prova, que deverá estar marcado na lateral do molde.

Após isso, fez-se o rebaixamento da roda e colocação do peso padrão (56 kg) com fixação do zero do contador de ciclos, para assim iniciar a execução do ensaio, vale salientar que o acionamento do aparelho foi definido para a realização dos estágios de 20, 50, 100, 200, 300, 500 , 700 e 1000 ciclos, com verificação do afundamento com o auxílio do paquímetro de profundidade, assim os critérios de parada para a execução do ensaio foram o término de todos os estágios de ciclos. (Figura 42).

Figura 42 – Execução do ensaio de LWT



3.7. TEMPERATURA SUPERFICIAL E QUANTIDADE DE REFLETÂNCIA DAS PLACAS

O fenômeno da Ilha de calor urbano é resultado por vezes do aumento excessivo de calor nas áreas centrais urbanas, que ocorre por diversos motivos, no então um dos principais é a alta absorção de calor que a pavimentação asfáltica convencional ocasiona, isso ocorre devido ao uso de materiais com baixa refletividade, assim diversos estudos afirmam que, uma alternativa viável para minimização desse aumento de temperatura no meio ambiente pode ser a mudança da coloração das superfícies asfálticas escuras para cores mais claras, as quais apresentam maiores índices de refletividade e são capazes de absorver menos calor, uma apresentam maior refletividade da radiação solar que chegam as superfícies.

A mudança na cor das superfícies urbanas pode ser obtida com o uso dos mais diversos materiais coloridos, nesse caso o PEAD, que se obtidos de cores variadas apresentam uma ampla paleta de tonalidades, fazendo com que a cor final seja influenciada principalmente pelo PEAD utilizado, além de serem materiais resistentes e duradouros.

Desse modo, para analisar o efeito da utilização do PEAD na mitigação das ilhas de calor urbano, assim como suas vantagens e desvantagens, e fazer um comparativo do comportamento térmico e mecânico das misturas asfálticas convencionais e coloridas, foi realizada a confecção de placas no próprio laboratório onde foram realizadas todas as dosagens.

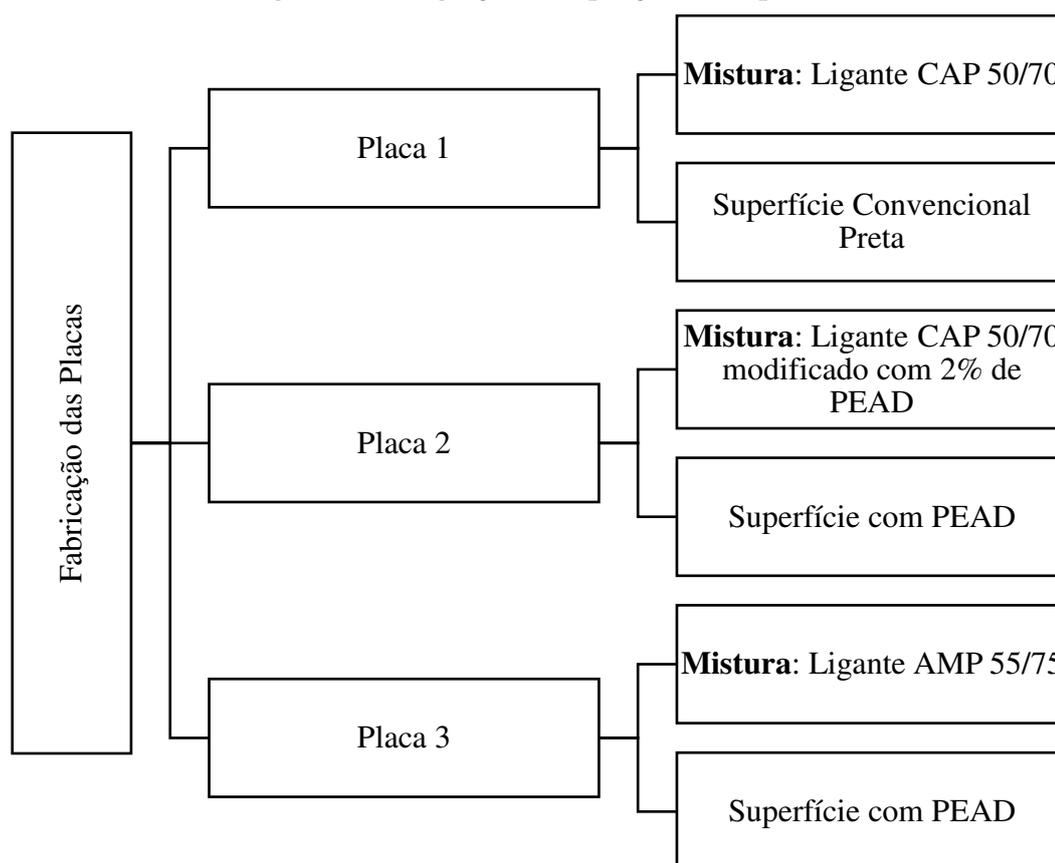
A avaliação do comportamento térmico das misturas asfálticas consistiu em verificar as temperaturas e a quantidade de refletância das 03 placas de misturas asfálticas fabricadas sendo uma convencional, uma modificada com PEAD e outra com AMP 55/75, tendo as duas últimas PEAD nas superfícies, que em seguida foram submetidas a exposição solar direta por um período de 02 meses, por 03 vezes na semana, nos horários entre 10h e 11h30min da manhã, em dias de céu limpo e sem presença de nuvens, na cidade de Campina Grande - PB.

3.7.1. Fabricação das placas

Conforme descrito na Figura 43, foram fabricadas três placas de revestimentos asfálticos, sendo uma convencional com CAP 50/70, a qual será referida como placa 1, e duas coloridas em Laboratório, misturadas uma com CAP 50/70 modificado com 2% de PEAD, dita placa 2, e outra com AMP 55/75, chamada placa 3, conforme pode ser observado na Figura 50. As placas foram fabricadas com a mesma metodologia SUPERPAVE utilizada na compactação de

todos os outros corpos de prova desta pesquisa, variando apenas o tamanho do cilindro para o de diâmetro equivalente a 15cm, para isto foram calculados os quantitativos de materiais de modo que ficasse com 4cm de altura, sendo uma com a mistura de referência, (amostra convencional) na cor preta e outras duas amostras com a disposição do PEAD na superfície, com o intuito de dar diferente coloração as misturas.

Figura 43 – Designação e composição das 03 placas



A dimensão final das placas ficou de 24x48cm e estas foram fabricadas com o intuito de realizar a medição da refletância e da temperatura superficial em campo. Os corpos de prova utilizados posteriormente na fabricação das placas foram moldados e compactados por amassamento através de um compactador giratório o SUPERPAVE. A moldagem dos corpos de prova coloridos foi realizada juntamente com a mistura convencional, após ser adicionado o ligante asfáltico aos agregados e misturados manualmente até se obter homogeneidade entre todos os materiais e levados novamente a estufa até o momento da realização da compactação, neste momento dispôs a mistura no cilindro do SUPERPAVE, e em seguida, fez-se uma camada de 20g de PEAD sobre a mistura, obtendo o CP conforme Figura 53.

Levando para a situação de campo, por exemplo, no caso do CBUQ, a aplicação seria similar a executada em laboratório, de modo que espalharia a mistura asfáltica normalmente e em seguida dispersava o PEAD sobre a mistura ainda quente e passaria com o rolo compactador para a rolagem de acabamento., assim o PEAD iria aderir a massa asfáltica naquela temperatura pré-definida e teríamos o paralelo do laboratório com o campo.

Figura 44 – Produção do CPs para a placa



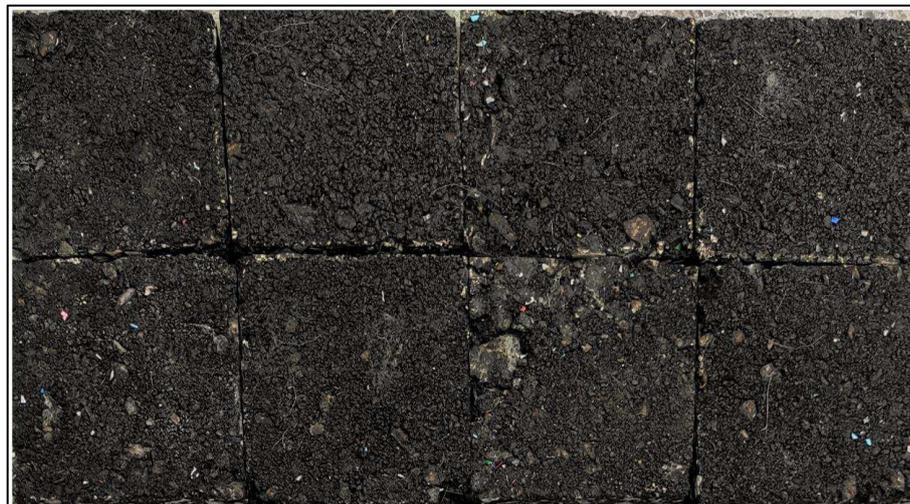
Esses CPs foram cortados com o auxílio de uma serra elétrica da marca Bosch, para remover todas as bordas dos círculos, obtendo assim um quadrado perfeito, conforme Figura 45, com vista a facilitar a montagem das placas, que posteriormente foram utilizadas para a medição da refletância e da temperatura superficial de cada amostra.

Figura 45 – a) Vista frontal e b) superior da placa medindo 12x12x4cm



Em seguida, organizou-se os CPs cortados e montou-se as placas com dimensões 48x24 cm de cada tipo experimentada. Assim, observa-se na Figura 46, a placa de cap 50/70, puro e de coloração preta, apontada como placa 1.

Figura 46 – Placa 1 para medir a refletância e a temperatura superficial fabricada na cor preta



Na Figura 47, vê-se a placa de Cap 50/70 modificado com PEAD, além de PEAD colorindo a superfície, apontada como placa 2.

Figura 47 – Placa 2 fabricado com ligante modificado e colorida com PEAD na superfície.



Na Figura 48, tem-se a placa de AMP 55/75, com PEAD colorindo a superfície, apontada como placa 3.

Figura 48 – Placa 3 para medir a refletância e temperatura superficial, fabricado com ligante do tipo AMP 55/75 e colorida com PEAD na superfície.



3.7.2. Medição da temperatura superficial

A medição da temperatura superficial foi determinada por meio de um equipamento específico para essa atividade um termômetro laser digital infravermelho modelo Anxin HC260, permite a medição da temperatura sem a necessidade de encostar o produto na superfície garantindo assim maior segurança e praticidade. O termômetro pode ser observado na Figura 49, na forma utilizada para medição das temperaturas.

Figura 49 – Termômetro digital infravermelho modelo Tg8818h Freedom



Para verificação da temperatura superficial foi aproximado o equipamento cerca de 5 cm da superfície das placas e aguardado um tempo estimado de 7 a 10 segundos para leitura da temperatura, conforme orienta o fabricante.

3.7.3. Medição da refletância solar

A medida da refletância nas placas se deu pela medida do albedo, que é a quantidade de radiação solar que é refletida por um corpo e a quantidade de radiação absorvida por ele, como demonstrado na Equação 1.

As medições foram realizadas a partir do posicionamento do equipamento medidor de radiação solar modelo power meter/TES -1333, que é um instrumento compacto, resistente e preciso para medir a radiação solar em campo, sobre cada uma das placas. (Figura 50).

Figura 50 – Medidor de radiação solar



Para se obter os valores da radiação refletida e radiação absorvida, foi verificada a radiação com sensor fotovoltaico de silício voltado para cima e para baixo sucessivamente, em seguida foi verificado a quantidade de albedo a partir da relação mostrada na equação 4. As medições de refletância e temperatura superficial de cada placa durou cerca de 2 min, sendo 1 min para medição da quantidade de radiação que é refletida (detector fotovoltaico apontando para cima) e 1 min para quantidade que é absorvida pela superfície (detector fotovoltaico apontando para superfície). Conforme Kowalski (2020), os valores de refletância são menores para corpos de coloração escura e maiores para corpos coloridos e brancos .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

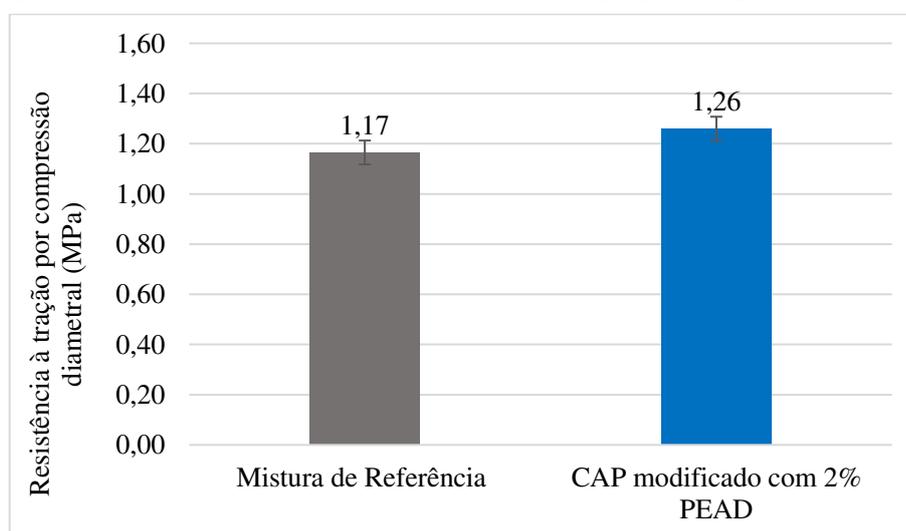
Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Serão comentados os resultados da caracterização mecânica, das misturas com o ligante puro e com o ligante modificado a partir da adição de PEAD, além da medição da temperatura superficial e da refletância das misturas.

4.1. ANÁLISE MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.1.1. Resistência a tração por compressão diametral

A Figura 51 apresenta os resultados oriundos do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral para as misturas asfálticas com e sem o PEAD no teor de 2%. Foram utilizados na realização do ensaio três corpos de prova para a mistura com PEAD e três para a mistura de referência.

Figura 51 – Resultados do ensaio de Resistência à tração por compressão diametral



O ensaio de tração indireta fornece um estado biaxial de tensões (horizontais de tração e verticais de compressão) na tentativa de se aproximar das condições produzidas na base das camadas de rolamento por uma carga de roda. Portanto, o que se pode observar é que nestes

termos, as amostras que utilizam o PEAD apresentaram valores levemente maiores de resistência em comparação a mistura de referência, propriedade essencial para que o pavimento mantenha seu desempenho diante da intensidade de aplicação e cargas de tráfego.

De acordo com o DNIT, o valor médio da RT deve ser de no mínimo 0,65MPa (25°C), em misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento. Observou-se que todas as misturas estão de acordo com o especificado pela norma.

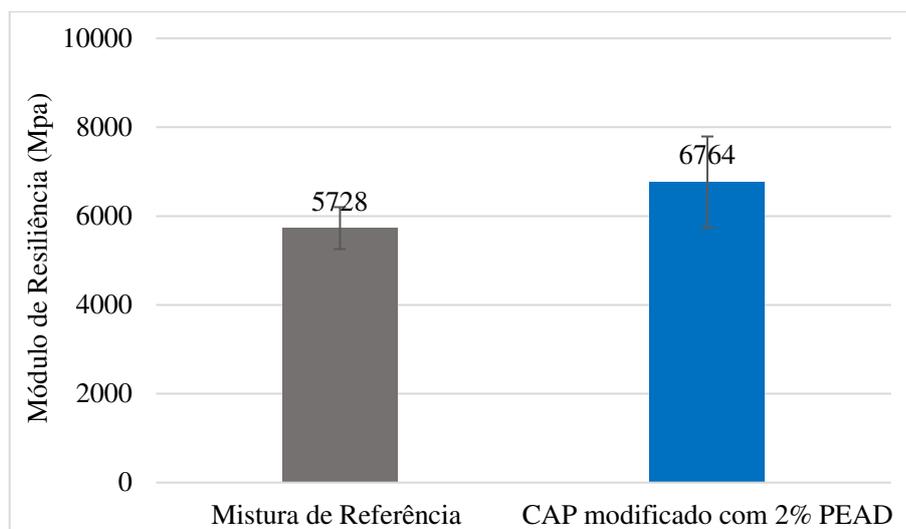
De acordo com Ahmedzade *et al.* (2017) que também estudou a incorporação PEAD no ligante asfáltico isso pode ter ocorrido devido as características do material, tido como um material termoplástico, o qual evidencia o enrijecimento da mistura asfáltica, assim como um endurecimento do ligante asfáltico.

Outros estudos corroboram, com os resultados aqui encontrados, Abed e Bahia, por exemplo, afirmam que os efeitos na resistência à tração são muito importantes para o estudo com o PEAD, e os efeitos nos valores de resistência foram dentro de 10% de melhoria, o que é bem próximo dos 7,14%, encontrados nesta pesquisa. Já Ibrahim em seu estudo obteve a melhoria de 8,6%.

Segundo Gama (2016) a resistência à tração de misturas asfálticas está relacionada a sua resistência à ruptura, que por sua vez é associada à resistência à fadiga. Dessa maneira, como as misturas asfálticas com adição obtiveram em média, maior resistência à tração se comparado a mistura de referência, isso significa maior resistência à ruptura.

4.1.2. Módulo de resiliência

O módulo de resiliência (MR) é uma medida equivalente ao módulo de elasticidade, porém é obtido por meio de solicitações de carregamentos repetidos de pequena intensidade que simula o efeito das passagens dos veículos no pavimento. São apresentados na Figura 52 os resultados provenientes desse ensaio que correspondem a média dos valores de três corpos de provas com 2% de PEAD e três para a mistura de referência.

Figura 52 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência

De acordo com Bernucci *et al.* (2008) os valores típicos de misturas asfálticas a 25 °C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Dessa maneira, notou-se que a adição PEAD incrementou o valor do módulo resiliente das misturas asfálticas em relação a mistura de referência, indicando uma maior consistência das misturas. Esse aumento no valor do módulo resiliente com a adição do PEAD está relacionado as mesmas causas do aumento de resistência à tração: aumento da consistência do ligante e enrijecimento da mistura asfáltica (VILLENA, 2014).

O aumento nos valores de MR nas misturas asfálticas modificadas em relação à mistura asfáltica convencional pode ser explicado devido ao aumento da rigidez que o PEAD apresenta.

Nesta pesquisa o aumento foi de 18,1% no MR das misturas com PEAD. Estudos como o de Ibrahim (2019), corroboram com os resultados obtidos nesta pesquisa, em seus estudos com PEAD, o autor obteve valores de MR de 6481 Mpa para mistura modificada com PEAD, o que corresponde a aproximadamente 14% em relação a sua referência. Para Moghadas *et al.*, (2014) houve uma melhoria de 15,5% para misturas com PEAD.

Todavia, afirmar que quanto maior o valor do Módulo de Resiliência melhor o desempenho da mistura asfáltica pode ser uma afirmação equivocada, uma vez que as misturas asfálticas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático e ser suficientemente flexíveis para suportar as solicitações do tráfego, e boa resistência à tração para evitar rupturas prematuras. Deste modo, a análise desse parâmetro não pode ser feita de forma direta, e valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser

considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem (PORTO, 2019).

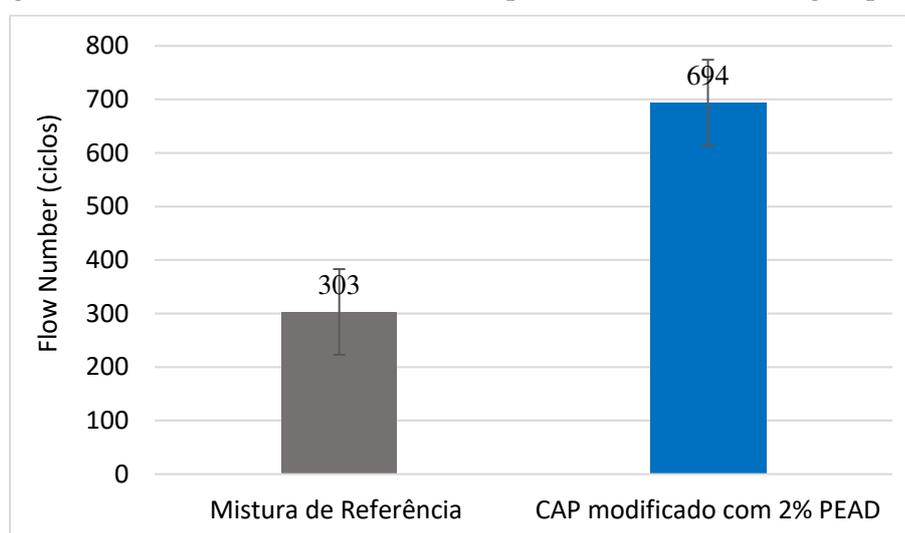
O módulo de resiliência de misturas asfálticas faz referência ao módulo de elasticidade deste material, desta forma quanto mais rígido, maior o módulo de resiliência. Todavia, uma maior rigidez não necessariamente indica maior resistência, valores maiores de parâmetro de dureza indicam que para uma dada carga houve baixa deformação da mistura. Ligantes muito rígidos e que não têm elasticidade podem resultar em uma menor vida de fadiga do pavimento (BROWN et al., 2010).

Assim, para entender melhor o efeito da rigidez e resistência das misturas modificadas com PEAD é preciso complementar a caracterização por meio dos ensaios de módulo dinâmico e deformação permanente, que são discutidos adiante.

4.1.3. Resistência à deformação permanente

A Figura 53 apresenta os valores médios do Flow Number (FN) e seus respectivos desvios-padrão para as misturas com e sem PEAD.

Figura 53 – Valores do *Flow Number* obtidos pelo ensaio uniaxial de carga repetida



As misturas asfálticas modificadas com PEAD apresentaram valores maiores em relação às misturas asfálticas de referência, ou seja, apresentaram maior resistência à deformação permanente. A adição do PEAD à mistura asfáltica aumentou a resistência à deformação

permanente em 129,1%. O efeito do enrijecimento do PEAD pode ser a justificativa do ganho na resistência à deformação permanente em relação à mistura de referência.

Resultados semelhantes foram encontrados em ensaios realizados por Gama *et al.*, (2016). Em que a modificação do ligante asfáltico com o polímero e polietilenos acarretam na melhoria da resistência à deformação permanente do ligante asfáltico. Observa-se o efeito semelhante em mistura asfáltica modificada com PEAD quando comparada ao ligante puro submetido à elevada temperatura o polímero mantém a rigidez e elasticidade do ligante asfáltico fazendo com que este permaneça mais flexível ao aliviar os esforços aplicados. Esse fato leva a crer que o ligante modificado aplicado em mistura asfáltica submetida a elevada temperatura aumenta a durabilidade do pavimento.

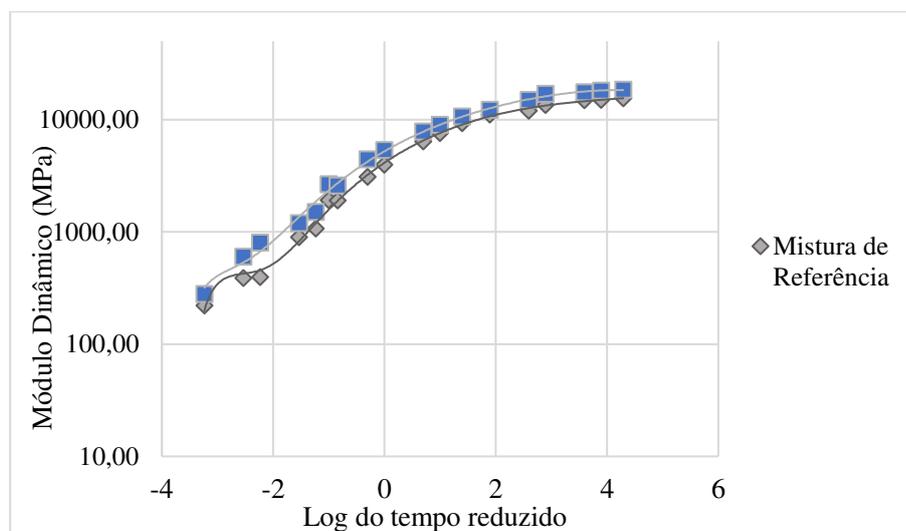
Nascimento (2008) indicou em seus estudos valores de FN mínimos para o adequado desempenho de misturas asfálticas em termos de deformação permanente, o autor aponta que misturas asfálticas densas dosadas para suportar tráfego médio (3×10^6 a 1×10^7 ESALs) devem apresentar FN mínimo de 300 ciclos, enquanto que para misturas destinadas ao tráfego pesado (1×10^7 a 3×10^7 ESALs), esse valor é 750. Para esses parâmetros, tanto a mistura de referência como a modificada atenderam o suporte para tráfego médio, no entanto a modificada foi a que mais se aproximou do suporte para o tráfego pesado.

Autores corroboram com os resultados deste estudo, GIBREIL e FENG (2017), afirmaram em seus estudos que a adição de PEAD também aumentou a resistência à deformação permanente nas misturas avaliadas.

4.1.4. Módulo dinâmico

As curvas mestras do módulo dinâmico apresentam uma caracterização geral da rigidez da mistura asfáltica em relação a frequência de aplicação de carga e temperatura de ensaio. A série de ensaios para o desenvolvimento das curvas mestras para a análise do desempenho da mistura foi efetuada a 4; 20 e 40° C durante o carregamento, a frequências de 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 e 25,0Hz para cada temperatura. Assim, as curvas foram elaboradas a partir dos dados de módulo dinâmico obtidos nas três temperaturas e seis frequências, por meio do processo de superposição tempo temperatura na temperatura de referência de 20°C. A Figura 54 apresenta as curvas mestras reunidas no gráfico.

Figura 54 – Curvas mestras das misturas asfálticas avaliadas



O módulo dinâmico serve como parâmetro de rigidez. Quanto menor o valor do MD, mais susceptível será o revestimento a deformações plásticas devido à baixa rigidez. A partir da Figura 54 pode-se notar que para todas as frequências de carga e temperatura, o módulo dinâmico da mistura com PEAD apresentou valores maiores do que as misturas de referência.

Por ser uma medida de rigidez, o módulo dinâmico também é influenciado pela temperatura. Observando as curvas mestras, percebe-se que as misturas avaliadas apresentaram comportamentos semelhantes no que diz respeito à queda da rigidez à medida que a temperatura aumentava. Percebe-se também que a rigidez das misturas também caiu à medida que a frequência de aplicação de carga diminuía.

Optou-se também por representar os resultados do ensaio de módulo dinâmico das misturas de Referência e com PEAD por temperatura de ensaio (Figura 55, Figura 56, Figura 57). Percebe-se que a introdução do PEAD, afetou o parâmetro de rigidez da mistura avaliada por meio da aplicação de carga senoidal em diferentes frequências, sendo a modificada com PEAD que apresentou maiores valores de módulo dinâmico nas três temperaturas.

Figura 55 – Módulo dinâmico das misturas asfálticas (4°C)

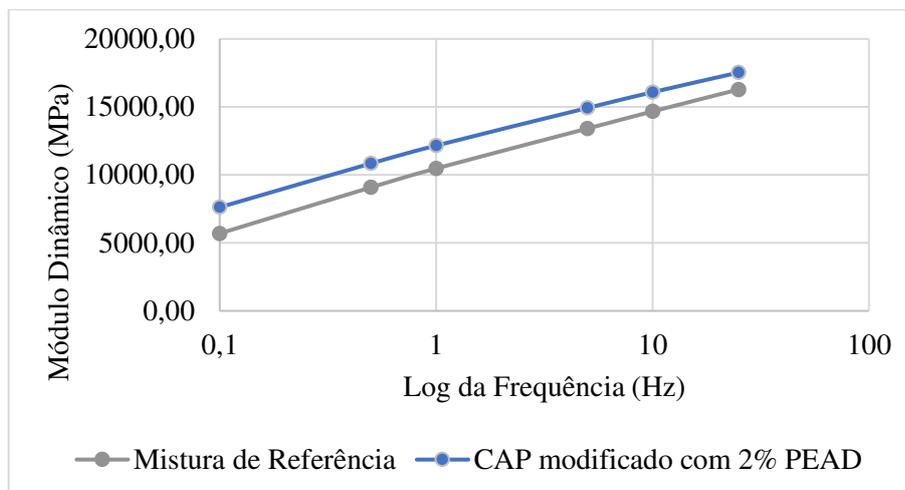


Figura 56 – Módulo dinâmico das misturas asfálticas (20°C)

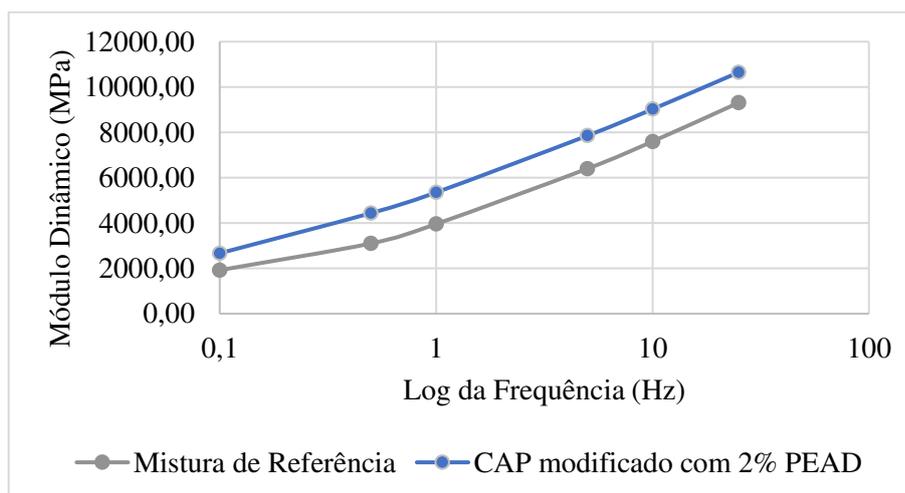
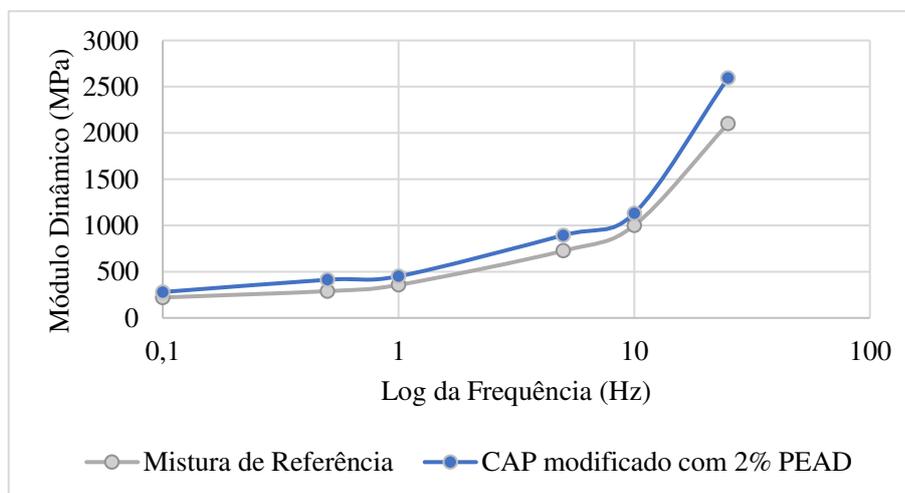


Figura 57 – Módulo dinâmico das misturas asfálticas (40°C)



Com os resultados foi possível observar o comportamento semelhante nas três temperaturas para as misturas com adição PEAD, com valores sensivelmente superiores nas três temperaturas em relação as misturas de referência. Assim, como houve um aumento da rigidez para as misturas modificadas foi possível verificar uma menor sensibilidade destas a variação de temperatura, em relação a mistura de referência. Fato esse observado visivelmente em todas as Figuras, em que as amostras com PEAD apresentaram valores superiores a mistura de referência.

A propriedade viscoelástica do material é determinada pelo ângulo de fase (diferença entre o pulso de tensão e o pulso de deformação), quanto maior for este ângulo maior será a viscosidade e menor a elasticidade. Do ensaio de módulo dinâmico foi possível obter também os gráficos que relacionam os ângulos de fase às frequências de ensaio para cada temperatura, conforme ilustram as Figura 58, Figura 59 e Figura 60.

Figura 58 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4°C)

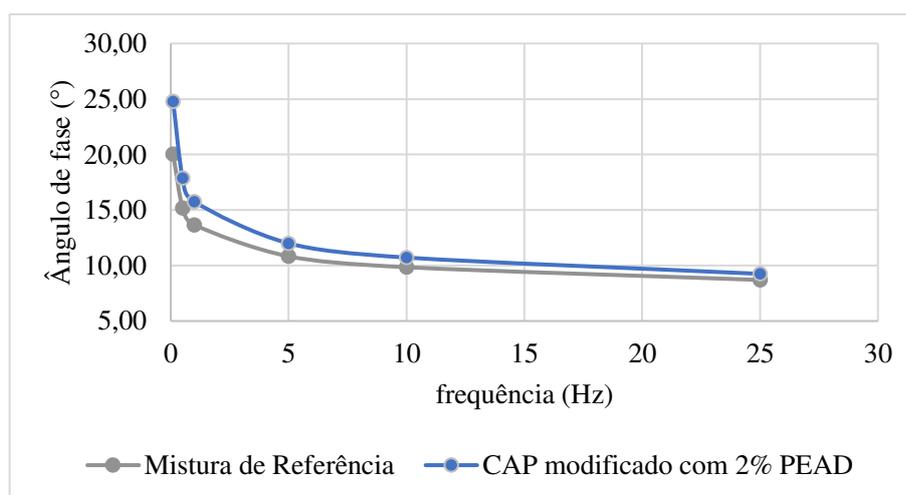


Figura 59 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (20°C)

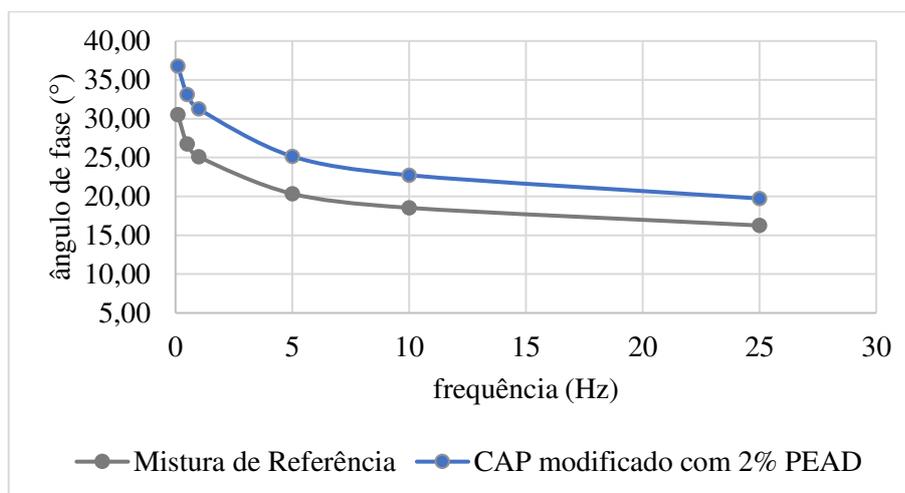
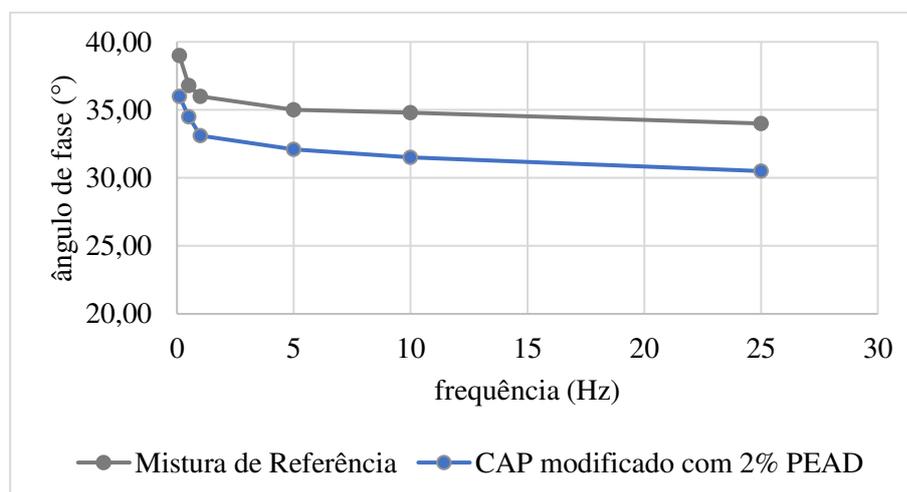


Figura 60 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (40°C)



Para todas as misturas analisadas, observou-se que o ângulo de fase aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da frequência. É observado que a mistura com PEAD apresenta o menor ângulo de fase, em relação a de referência para $T=40^{\circ}\text{C}$.

Segundo Costa (2017) o ângulo de fase a baixa frequência e a temperatura elevada é afetado pelo agregado e a maior parte da energia dissipada se dá devido a interação ligante-agregado que apresenta uma tendência de diminuição do ângulo de fase. Sendo assim é possível observar que a baixas frequências e altas temperaturas as misturas modificadas apresentaram ângulo de fase maior, levando a crer que a maior parte da energia foi dissipada no comportamento viscoelástico das misturas modificadas, podendo assim dizer que esse comportamento da mistura pode ser atribuído ao ligante presente na mistura.

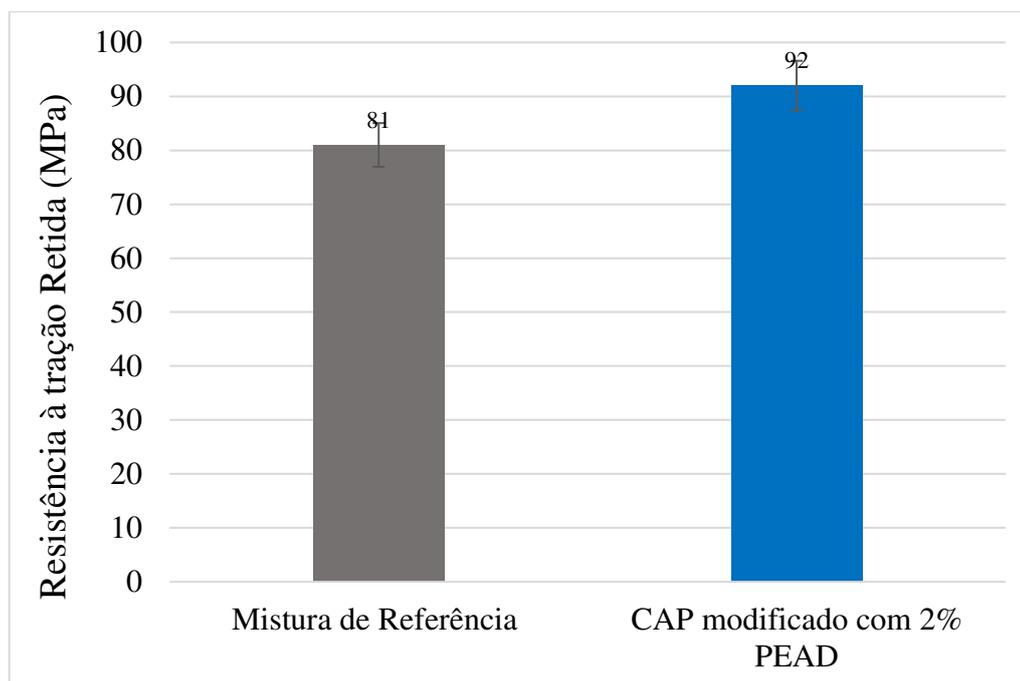
Em termos de elasticidade, o ângulo de fase é usado para caracterizar melhorias nas propriedades elásticas de ligantes modificados. A melhoria das propriedades elásticas é indicada pela redução de tal parâmetro. Os resultados deste estudo foram usados para criar uma análise comparativa da elasticidade entre os ligantes puros e modificados. Os resultados dos ensaios mostraram que a adição de modificadores do tipo PEAD resulta em um aumento de ângulo de fase nas temperaturas mais baixas (4°C e 20°C), porém uma diminuição na temperatura mais alta (40°C), sugerindo uma melhora na resposta elástica dos ligantes em altas temperaturas, assim como visto também em Gama et al. (2016).

Os ângulos de fase do CAP modificado nas temperaturas 4°C e 20°C, apresentaram valores maiores que os obtidos para o CAP 50/70 convencional, ou seja, as modificações do CAP diminuíram inicialmente a elasticidade, o que também foi constatado no estudo de Guimarães (2019) com adição de PEAD, isso deve-se ao fato do PEAD ser um material termoplástico que, a uma dada temperatura, apresenta alta viscosidade.

Em sua conclusão, Gama (2016), confirma que o uso do PEAD mostrou melhora no comportamento elástico do ligante asfáltico em maiores temperaturas, para o autor a adição PEAD proporcionou um aumento na rigidez em todas as temperaturas e melhora na resposta elástica em elevadas temperaturas. O uso desse material pode resultar em uma mistura asfáltica modificada com alto desempenho de trabalho em temperaturas altas e intermediárias.

4.1.5. Dano por umidade induzida

Os resultados de RRT para as amostras com CAP 50/70 puro e modificado com PEAD utilizados neste trabalho estão apresentados na Figura 61.

Figura 61 – Resultados do dano por umidade induzida

Esse ensaio foi realizado seguindo as especificações da norma AASHTO T 283 – 14 e sugere que pelo método SUPERPAVE a RRT mínima deve ser de 80% enquanto que a especificação do DNIT 031/2006 preconiza que este valor deve ser superior a 70%. A mistura de referência atendeu o requisito mínimo e a mistura com o ligante modificado apresentou resultado superior ao mínimo exigido para um bom desempenho da camada de revestimento.

Os ensaios com as misturas modificadas mostram que a adição do PEAD proporcionou um aumento no valor da resistência à tração retida da mistura de 13,5%, concordando com Carvalho (2018), afirma um aumento de 18% na RRT do ligante modificado.

Os valores de RRT das misturas asfálticas modificadas com PEAD foram superiores a 35%, evidenciando assim uma melhora significativa na resistência ao dano por umidade após a modificação (GIBREIL e FENG, 2017).

4.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS REVESTIMENTOS

Nesta parte são abordados os resultados do ensaio de resistência ao desgaste, *loaded wheel test* (LWT) que teve como objetivo avaliar a capacidade das misturas a aderirem ao PEAD dispostos nas superfícies e resistirem aos esforços abrasivos gerados pelo tráfego, ou seja, verificar a potencialidade da aplicação de PEAD em revestimento de pavimentos.

Na Figura 62 abaixo é possível observar os CPs de LWT, após serem submetidos ao desgaste.

Figura 62 – CPs de desgaste, respectivamente, cap 50/70, cap 50/70 modificado com PEAD e AMP 55/75.

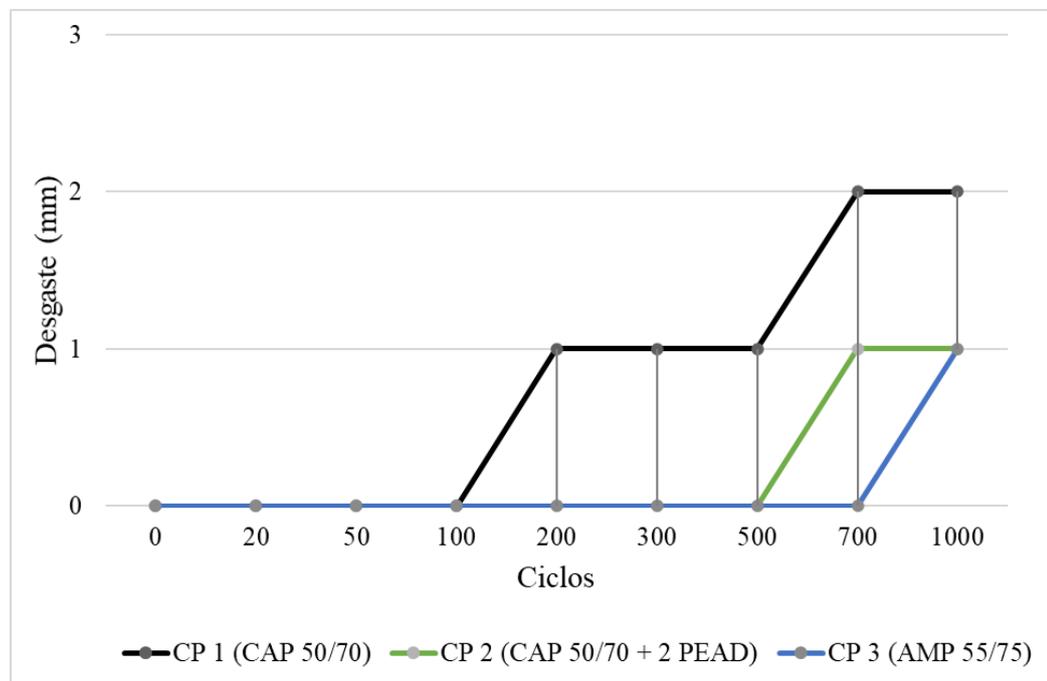


Neste ensaio foi possível notar que a temperatura de compactação, influenciou diretamente na adesão do granulado de PEAD nas superfícies das misturas, ou seja, quanto maior foi a temperatura de compactação, mais bem aderido e resistente ao desgaste ficou o PEAD na superfície.

Na Figura 63, tem-se o resultado em milímetros do desgaste dos CPs, nota-se que o CP 1 foi o que mais se desgastou, com um desgaste de 2mm a partir de 500 ciclos, seguido do CP com um desgaste de 1mm a partir de 700 ciclos, e por fim o CP 3 com o menor desgaste de 1mm em 1000 ciclos. Este resultado reforça a influência da temperatura de compactação dos

CPs , pois os CPs que melhor aderiram as camadas dispostas de PEAD, foram os de maiores temperaturas de compactação.

Figura 63 – Análise do desgaste superficial dos CP's LWT



4.3. ANÁLISE DAS REFLETÂNCIAS E DAS TEMPERATURA DAS PLACAS

O mecanismo dos pavimentos frios de albedo elevado está baseado na ideia que com o incremento da refletância da superfície do pavimento, uma menor quantidade de radiação solar será absorvida, diminuindo a temperatura diurna do pavimento. Esta baixa temperatura permitirá que a temperatura do ar seja menor a nível do solo.

Analisando as placas da Figura 64, nelas é possível notar uma maior predominância de cor na placa 3 de AMP, isso devido a melhor aderência de PEAD e conseqüentemente menos espaços pretos, por conseqüência, nota-se maiores albedos nas placas mais coloridas, do que na convencional.

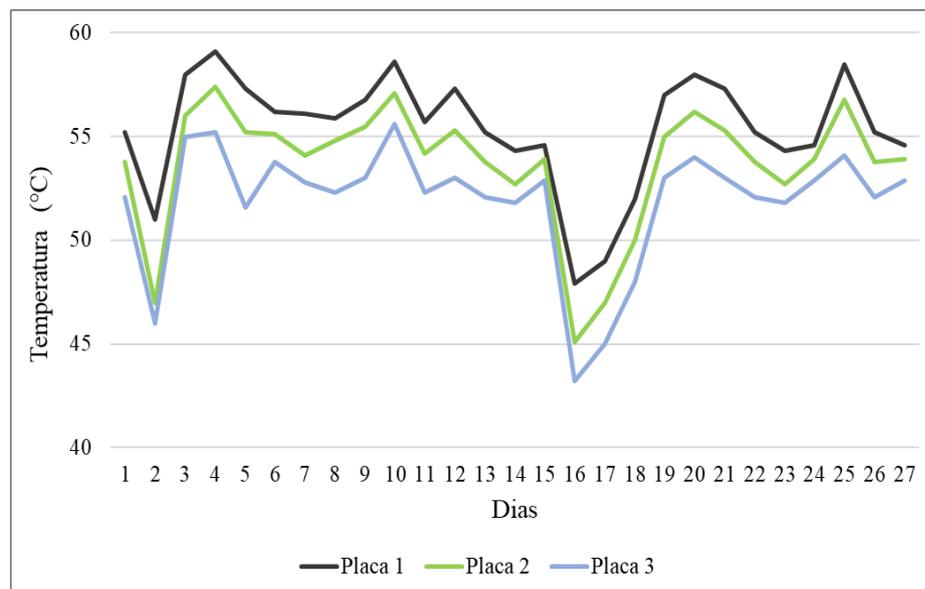
Figura 64 – Placas, respectivamente, cap 50/70 puro, cap 50/70 modificado com PEAD e AMP 55/75 com PEAD na superfície.



4.3.1. Avaliação da temperatura dos revestimentos

Ao observarmos a Figura 65 temos os resultados das medidas de temperaturas para cada dia nos horários entre 10:30 às 11:30 da manhã, em cada placa.

Figura 65 – Temperatura das misturas asfáltica



Ao analisar as misturas no período total de 2 meses, de 30 de novembro de 2021 a 30 de janeiro de 2022, em que foram realizadas medições ao longo de 27 dias de céu limpo e sem nuvens, na figura 65 é possível verificar que as maiores temperaturas foram encontradas para a mistura de referência (Placa 1), com um pico de 59,1°C, verifica-se também que as temperaturas com a mistura do CAP 50/70 modificado com PEAD, (Placa 2), foram inferiores as da mistura de referência, todavia ainda foram superiores as de AMP 55/75 (Placa 3). Isso ocorre por consequência da adesão do granulado de PEAD a superfície das placas.

Essa situação já era esperada, visto que, a temperatura medida está relacionada principalmente com a cor dos revestimentos, onde os mais reflexivos apresentam menores temperaturas (VILLENA, 2014) e na presente pesquisa a mistura da placa 3 apresentou valores de albedo superiores, porém não tão distantes dos valores da placa 2.

Neste estudo foram obtidas as médias de temperaturas de 55,4°C para a placa 1, 53,7°C para a placa 2 e 51,9°C para a placa 3, fazendo uma comparação das placas coloridas 2 e 3 com a placa 1 de referência, nota-se que a temperatura média da placa 2 foi menor em 1,7°C do que a placa de referência e a placa 3 diminuiu em 3,5°C. Fazendo uma análise desses resultados com o estudo de Porto (2019), que usou óxido de ferro para colorir as misturas, a autora obteve as temperaturas médias de 42,0°C para uma mistura com a adição do corante vermelho, 43,9°C para a mistura com corante amarelo e 44,7°C para a mistura de referência. Portanto foi possível obter uma diferença de 2,7°C quando comparou a mistura de referência com a mistura de coloração vermelha e de 1°C para a coloração amarela.

4.3.2. Avaliação da refletância das misturas asfálticas

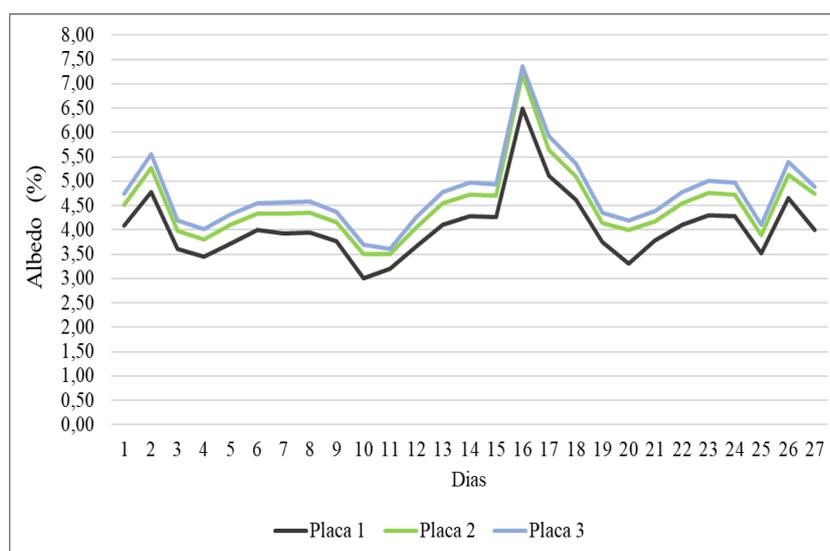
Ao observarmos a Tabela 17 e a Figura 66, temos os resultados das medidas de refletância, em número de albedos para cada dia nos horários entre 10:30 às 11:30 da manhã, em cada placa.

Tabela 17 – Resumo dos valores de Albedo das misturas asfálticas

	Placa 1	Placa 2	Placa 3
Albedo Total	109,72	121,92	127,82
Média dos Albedos	4,06	4,51	4,73
Diferença dos albedos (%)	--	9,9	14,2

Pode-se perceber com base nos resultados obtidos a partir da medição do albedo, que mesmo que não fosse realizada a medição da temperatura superficial dessas amostras, com base apenas na medição do albedo seria possível perceber uma significativa mudança em valores percentuais de temperatura das superfícies (Tabela 17), aumento esse superior a 14% quando comparando a placa 3 com a placa 1, e 9,9% ao comparar com a placa 2, ambas placas coloridas, ofereceram resultados mais favoráveis do que a mistura de referência. A Figura 66, ilustra tais valores.

Figura 66 – Albedos das misturas asfálticas



Ao analisar as misturas no período total de 2 meses, é possível verificar que os maiores albedos foram encontrados para as misturas de AMP 55/75 com PEAD na superfície (Placa 3) e modificada com PEAD na superfície (Placa 2), com valores respectivos de 7,36 e 7,2 de albedo, verifica-se também que os albedos com a mistura de referência (Placa 1), foram inferiores as com PEAD. Isso ocorre por consequência da adesão do granulado de PEAD a superfície das placas, a placa 1, com superfície negra apresenta um menor albedo devido a cor escura de sua superfície, as placas 2 e 3, diferem levemente no valor do albedo devido a adesão do PEAD, ter ocorrido na maior temperatura, isso explica alguns espaços com menos PEAD na placa 2.

Essa situação já era esperada, pois assim como a temperatura medida, está relacionada principalmente com a cor dos revestimentos, onde os mais reflexivos apresentam maiores valores de albedo (VILLENA, 2014) e na presente pesquisa a mistura da placa 3 apresentou valores de albedo superiores, porém não tão distantes dos valores da placa 2.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo mostraram que a incorporação de PEAD nas misturas asfálticas e nas superfícies, tem grande influência tanto nas propriedades reológicas como mecânicas das misturas asfálticas, além de sua contribuição, quando disposto na superfície, na redução da temperatura superficial e no aumento da refletividade dessas superfícies.

Observou-se nesta pesquisa que a adição de PEAD no teor de 2%, contribui para um menor envelhecimento do ligante, e um aumento da viscosidade, sem prejudicar a trabalhabilidade dos CAP's modificados, uma vez que CAP's mais viscosos produzem maior filme de recobrimento dos agregados e maior resistência aos efeitos do envelhecimento, além dos valores do índice de penetração que aumentaram, sugerindo que a adição de PEAD pode diminuir a sensibilidade à temperatura do ligante asfáltico.

Com relação a análise mecânica foi possível concluir que as misturas asfálticas com adição PEAD apresentaram melhores resultados, evidenciando uma maior resistência à tração e à ruptura. Além do aumento da resistência a deformação permanente, visto que, as misturas com PEAD podem ser utilizadas em zonas de tráfego médio. A adição de PEAD aumentou a faixa de temperatura, no ligante asfáltico, para resistir à deformação permanente e melhorou as propriedades das misturas asfálticas no que tange o desempenho em altas temperaturas.

Quanto ao comportamento térmico das misturas asfálticas com PEAD na superfície, sabe-se que aumentar a refletância solar de uma superfície pavimentada a mantém mais fria sob o sol e retardam a formação de ICU. Os dados medidos indicam claramente que o aumento da refletância solar dos pavimentos em média de 4,73 causou uma diminuição significativa da temperatura do pavimento em até 3,5 °C, para as superfícies com PEAD. Deste modo, as maiores temperaturas foram encontradas para as misturas de referência com pico de 59,1°C. Evidenciando assim a possibilidade do uso de PEAD nas superfícies de misturas asfálticas como agente colaborador para redução das ICUs.

Observou-se nesta pesquisa que a temperatura de compactação influenciou na coloração das misturas com PEAD, uma vez que os menores desgastes e as melhores aderências ocorrem nas maiores temperaturas de compactação, isso pode ser visto ao analisar o desgaste dos CPs 1, 2 e 3, em que o CP 1, teve um maior desgaste da camada de PEAD em sua superfície, enquanto

que o CP 3, promoveu uma melhor aderência, e houve uma mínima diferença nas superfícies entre o CP 2 e o CP 3, por terem sido compactados em temperaturas mais próximas e mais elevadas que o CP 1, evidenciando assim que maiores temperaturas promovem menores desgastes nas superfícies das misturas com PEAD.

Portanto a incorporação de PEAD em ligantes asfálticos proporcionou benefícios como diminuição da deformação permanente, melhoria no desempenho frente as solicitações impostas pelo tráfego, diminuição na susceptibilidade térmica e ainda forneceu ao ligante, quando disposto em sua superfície, a coloração das misturas de modo a ser um agente contribuinte a redução de temperaturas em áreas pavimentadas.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com a finalidade de aprofundar os resultados encontrados nessa pesquisa, propõe-se para trabalhos futuros:

- a) Analisar desgaste pelo ensaio cântabro;
- b) Avaliar misturas asfálticas, produzidas com a adição de PEAD em granulometrias menores;
- c) Realizar a implementação das misturas de referência e com PEAD em trechos experimentais para acompanhamento e verificação de desempenho, e comparar os resultados com os encontrados em laboratório;
- d) Avaliar superfícies com PEAD, separado por coloração, com o intuito de elevar o valor do albedo;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABED, A.H.; BAHIA, H.U. Enhancement of permanent deformation resistance of modified asphalt concrete mixtures with nano-high density polyethylene. *Construction and Building Materials*.2020.

AHMEDZADE, P., GUNAY, T., GRIGORYEVA, O., STAROSTENKO, O. Irradiated recycled high density polyethylene usage as a modifier for bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 3, p. 04016233, 2017.

ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Influence of different surfaces on the temperature and energy flux: an experimental trial. *Ambiência*, V. 8(1), 101-111. . (2012).

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION.
AASHTO M 320: Standard specification for performance-graded asphalt binder. Washington, DC, Estados Unidos, 2016.

_____. *AASHTO T283: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Washington, DC, Estados Unidos.2014

_____. *AASHTO T342: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Washington, DC, Estados Unidos, 2019.

ANDRADE, J. R.M. *O efeito da modificação de ligante asfáltico com uma resina fenólica: cardanol-formaldeído*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Ceará. 2016.

ARAÚJO, F. *Aditivo polimérico derivado de fonte renovável para aplicação em cimento asfáltico de petróleo*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review o turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, v. 23, p. 1-26, 2003.

ASSIS, M. W. V.; SANTOS, T. T. Propriedades químicas, problemas ambientais e reciclagem de plástico: uma revisão de literatura/chemical properties, environmental problems and plastic recycling: a review. *Jornal Interdisciplinar de Biociências*, 5(1), 31-37. (2020).

ASUKAR, S. D. et al. Utilization of Lignin as na Antioxidant in Asphalt Binder. *International journal of innovative research in technology, IJIRT*, v. 2, n. 12, p. 198-207, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13230:2008 – *Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis – identificação e simbologia*. Rio de Janeiro.

_____. NBR 14841. (2002). *Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica — Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT*. Rio de Janeiro.

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

_____. *ASTM D6925: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*. Estados Unidos, 2015.

_____. *ASTM D4791: Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. Estados Unidos, 2019.

_____. *ASTM D5821: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*. Estados Unidos, 2017.

_____. *ASTM D2419: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. Estados Unidos, 2014.

_____. *ASTM D5/D5M-20. Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*: Estados Unidos, 2020.

_____. *ASTM D36/D36M-14: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen*: Estados Unidos, 2020.

_____. *ASTM D4402/D4402M-15. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. Estados Unidos, 2015.

_____. *D7369-15 Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Asphalt Mixtures by Indirect Tension Test*. Estados Unidos, 2020.

_____. *ASTM D2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)* Estados Unidos, 2019.

_____. *ASTM D6373 Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. Estados Unidos, 2021.

_____. *ASTM D8292: Standard Test Method for Permanent Deformation Behavior and Rutting Resistance of Compacted Asphalt Mix in the Modified Loaded Wheel Tracker Test Utilizing Controlled Confining Pressure*. Estados Unidos, 2020.

_____. *ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Estados Unidos, 2019.

_____. *ASTM C127: Standard Specification for Fiber-Reinforced Gypsum Panel*. Estados Unidos, 2015.

_____. *ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Estados Unidos, 2019.

_____. *ASTM C131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Estados Unidos, 2020.

_____. *ASTM C1252: Standard Test Methods for Uncompacted void content of fine aggregate. (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*. Estados Unidos, 2019.

_____. *ASTM C496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Estados Unidos, 2017.

AZARHOOSH, A. R. Using the surface free energy method to evaluate the effects of nanomaterial on the fatigue life of hot mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 10, p. 04016098, 2016

AZEVEDO, T. S. et al. Ilhas de calor e *Aedes aegypti*: um estudo preliminar para a cidade de Santa Bárbara d'Oeste, SP-BRA, utilizando sensoriamento remoto. São Paulo, *Novas Edições Acadêmicas*, p. 19-33, 2013.

BADESCU, V. *Modeling Solar Radiation at the Earth ' s Surface Recent Advances*. Romania: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008. 501p.

BETUSEAL. *Rua colorida no Rio de Janeiro. 2016* Disponível em:<<https://www.solutudo.com.br/empresas/rj/rio-janeiro/impermeabilizacao-mantas-asfalticas/betuseal-aplicacao-de-selantes-s-a-15751203> 2016>. Acesso 10 jan. 2021.

BORDONALLI, A. C. O.; MENDES, C. G. D. N. Reuso de água em indústria de reciclagem de plástico tipo PEAD. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 14, 235-244. 2009.

BRASILEIRO, L. *et al*. Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability*, v. 11, n. 3, p. 646, 2019.

BRASILEIRO, L. L. *Utilização de resíduos poliméricos como modificadores das propriedades do ligante asfáltico*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Piauí. PIAUÍ. 2019.

BRINGEL, R. M. *Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2017.

BROWN, A. V. El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e investigación*, v. 30, n. 3, p. 27-44, 2010.

CALLEJAS, I. J. A *et al.* Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas. *E&S Engineering and Science*, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 64-72, 2015. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/2555>> Acesso em: 18 dez. 2021.

CARNIELO, E.; ZINZI, M. Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. *Building and Environment*, v. 60, p. 56–65, 2015.

CARVALHO, M. A. R. *Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cap 50/70 modificado por polímero reativo/ não-reactivo e ácido polifosfórico*. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2018.

CASTILLO, S.Z. *et al.* Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite. *Construction and Building Materials*, 106, 349–356. 2016.

COSTA, L.F. *análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2017.

COUTINHO, M. B. *et al.* Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações. *Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 13, nº 1, p. 1- 13, 2003.

CRAFT. *Pavimentos coloridos no Brasil*. 2016. Disponível em:<<http://www.craftengenharia.com.br/>>. Acesso 15 jan 2021.

DANTAS, M. J. F. Análise do albedo da superfície e índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do rio Pacoti/CE. *Revista Tecnologia* . 2018.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT-ME 385/99. *Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero*. Rio de Janeiro, 1999.

_____. *DNIT 095:2006. Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material*. Rio de Janeiro, 2006.

_____. *DNIT 031:2006. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2006.

DIRECTINDUSTRY. *Espectroradiômetro UV/Vis MS-711*. 2020. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/eko-instruments/product-188697-2013371.html>> Acesso em 15 de janeiro de 2021.

DOULOS, L.; *et al.* Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*, v. 77, n. 2, p. 231–249, 2004.

FANG, C. *et al.* Nanomaterials Applied in Asphalt Modification: A Review. *Journal of Materials Science & Technology*, 589-594, 2013.

FANG, C. Q. *et al.* Effect of preparation temperature on the aging properties of waste polyethylene modified asphalt. *J. Mater. Sci. Technol.*, 31 (3), 320–324. 2015.

FANTON, T. Application of the prescriptive method RTQ-C in the analysis of the thermal performance level of the envelope of public buildings in Cachoeira do Sul/RS. *Ciência e Natura*, v. 42, p. 85, 2020.

FARIAS, L. G. A. T. *et al.* Effects of nanoclay and nanocomposites on bitumen rheological properties. *Construction and Building Materials*, 125, p. 873–883. 2016.

FONTOURA, E. *Incorporação de flocos reciclados de polietileno em ligante asfáltico*. (Dissertação de Mestrado). UFRGS. Porto Alegre. 2019.

FORLIN, F. J.; FARIA, J. AF. Considerações sobre a reciclagem de embalagens plásticas. *Polímeros*, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2020.

FRANÇA, M. V. F., *et al.*. A inserção de materiais recicláveis na estrutura de pavimentos rodoviários e vias urbanas. : *CONSTRUINDO*. v11. Belo Horizonte (2019).

FREMIX. *Pavimentação e Construções: Empresa brasileira pioneira na tecnologia de reciclagem a frio em usina KMA*. São Paulo. Disponível em: <<https://fremix.com.br/>> .Acesso em Jan. 2021.

GAMA, D. A.; ROSA, J. M.; DE MELO, T. J. A.; RODRIGUES, J. K. G. Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Materials*, v. 106, p. 290–295, 2016.

GIBREIL, H. A.; FENG, C. P. Effects of High Density Polyethylene and Crumb Rubber Powder as Modifiers on the Properties of Hot Mixed Asphalt. *Material Economics. Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*, 2017.

GUIMARÃES, M. E. *Efeito da adição de resíduos de polietileno de alta densidade e borracha de pneus em ligante asfáltico 50/70* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu. 2019.

GODOI, L. C. *Aplicação do ensaio de flexão em amostra semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

GEODESIGN. *Pireliômetro - medição de irradiância solar direta normal (dni)*. 2020. Disponível em: <http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Pyrheliometer_RS.html>. Acesso em 15 de janeiro de 2021.

HESAMI, S., SADEGHI, V., AZIZI. AInvestigation of modified bitumen's rheological properties with synthesized polyurethane by MDI-PPG reactive prepolymers. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2021.

HONG, Z. *et al.* Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on laboratory properties of low-density polyethylene (LDPE)/ethylene-vinyl acetate (EVA) compound modified asphalt. *Journal of Cleaner Production* , p. 130677, 2022.

IBGE. Censo demográfico 1940-2010. *Anuário Estatístico do Brasil*, vol. 42, 1979. Disponível em:<<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=POP122>> Acesso nov. 2021.

IBGE. Áreas urbanizadas do Brasil : 2015. *Série Relatórios Metodológicos*. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em:< <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2100639>> Acesso nov. 2021.

IBRAHIM, A. H. A. Laboratory investigation of aged HDPE-modified asphalt mixes. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2019.

ISMAGILOVA, Elvira et al. Cidades inteligentes: avanços na pesquisa - uma perspectiva de sistemas de informação. *International Journal of Information Management* , v. 47, p. 88-100, 2019.

KASVI. *Espectrofotômetro Digital Com Faixa Visível de 325 à 1020nm Kasvi*. 2020. Disponível em :< <https://www.lojaprolab.com.br/espectrofotometro-digital-com-faixa-visivel-de-325-a-1020nm-kasvi-91041>> Acesso em 15 de janeiro de 2021.

KAZA, S., *et al.* What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. *World Bank Publications*, 2018.

KIM, H. H., *et al.* Performance evaluation of polymer modified asphalt (PMA) binders containing ground tire rubber (GTR). *International Journal of Pavement Research & Technology*, 12(2). 2019.

KOWALSKI, L.F. et al. Implicações da Morfologia Urbana na Temperatura Superficial de Pavimentos. *Revista Científica ANAP Brasil*, v. 13, n. 29, p. 2020, 2020.

KRUGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. *Ambiente Construído*, v. 16, n. 3, p. 89–106, 2016.

LIN, D. F., LUO, H. L. Fading and color changes in colored asphalt quantified by the image analysis method. *Construction and Building Materials*, v.18, 255-261. 2014.

MALSHE, V.C., BENDIGANAVALE, A.K. Infrared reflective inorganic pigments. *Recent Patents on Chemical Engineering* , 1 (1), 67-79.2008.

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 asfáltico de petróleo*. (Tese de doutorado). UFMG-Belo Horizonte. 2015.

MARINOSKI, D. et al. *Guia de medição e cálculo para refletância e absorvância em superfícies opacas*. v. 1, Centro Brasileiro de eficiência energética em edificações. Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

MELLO, M. S. *Avaliação das propriedades reológicas e mecânicas de ligantes e misturas asfálticas irradiadas*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

MOGHADAS, N.; AZARHOOSH, A.; HAMED, G. H. Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt—a laboratory study. *Road Materials and Pavement Design*. 2014.

MORILHA , A. J. *Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.

MURANA, A. A et al. Influence of polyethylene from waste pure water sachet on properties of hot mix asphalt. *Nigerian Journal of Technology*, v. 39, n. 4, p. 1043-1049, 2020.

NASCIMENTO, L. *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

OLIVEIRA, V. C., et al. Avaliação de cinzas de carvão mineral e cera de carnaúba como aditivos em ligantes asfálticos e a incorporação da cinza como fíler mineral em misturas asfálticas. *32º ANPET- Congresso de pesquisa e ensino em transportes*. Gramado-RS. 2018.

PATRÍCIO, J.D. *Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2015.

PEREIRA, E. R. *Viabilidade técnica do reaproveitamento e valorização das borras de pead provenientes do processo de injeção de termoplásticos*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.

PEREIRA, A.G. et al. Ligantes asfálticos modificados: Uma análise bibliográfica. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 4, 2021.

PINCHA. *Asfalto Colorido Portugal*. 2020. Disponível em: <<https://www.publico.pt/2020/07/06/local/noticia/lisboa-rua-pintada-azul-seguemse-1923276>>. Acesso 10 jan 2022.

PIVETTA, M. Ilha de calor na Amazônia. *Revista Pesquisa Fapesq*. Ed. 200. 2012. São Paulo. Pag 79-81. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/folheie-a-edi%C3%A7%C3%A3o-200/>. Acesso: 15 nov. 2020.

PORTO, T.R. *Utilização do óxido de ferro em misturas asfálticas objetivando reduzir os efeitos das ilhas de calor urbano*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2019.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, v. 37, n. 4, 2005. p. 295–300, 2005.

ROMERO, M. A. B. et al. *Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas*. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Ed 1. Editora ETB.2020.

ROSENFELD, A. H. et al.,. Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*. v.28, 1998. p. 51–62.

ROSSO, A P. et al. *Desenvolvimento de células e módulos de referência para medição da radiação solar*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2019.

SANTAMOURIS, M. et al. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, v. 85, n. 12,2011. p. 3085–3102.

SANTOS, N. S.,et al. Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70. *Matéria*, Ed.23. São Paulo.2018.

SANTOS, A. M. *Engenharia de produção: novas fronteiras, soluções, problemas e desafios*. AYA Editora. 2021.

SAVINI, G. *Modulação da morfologia e dos padrões térmico e mecânico do polietileno de alta densidade (PEAD) com uma incorporação de etileno-acetato de vinila (EVA) e baixos preços de nanotalco sintético*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2020.

SCHROEDER, J. A. R.. etal.,. Vantagens econômicas da logística reversa na construção civil. Jornada De Iniciação Científica, 2016.

SILVA, C. V. P. S. *Efeito nas propriedades mecânicas da adição de ácido polifosfórico no desempenho de mistura asfáltica modificada com terpolímero do tipo reativo*. Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. 2017. Recife. Disponível em: <<http://www.anpet.org.br/tempsite/xxxianpet/index.php/2015-04-02-16-26-21>>. Pernambuco: Recife, 2017. Acesso 18 de dezembro de 2021.

SILVA, J. A. A. *et al.* Avaliação reológica de ligante modificado com Politereftalato de etileno(PET). *Matéria*. v.23.2018.

SILVA, J. S.; Pimentel, M. G. R. F. Uso de resíduos na pavimentação rodoviária. *Research, Society and Development*, v.10. 2021.

SPINACÉ, M. A. D. S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química nova*, 28(1), 65-72. 2015.

SYNNEFA, A. *et al.* Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment*, v. 46, n. 1, p. 38–44, 2016.

TANG, P., *et al.* Investigation of rheological properties of light colored synthetic asphalt binders containing different polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, v.161, 175-185. 2018.

TECVIA. *Empresa de pavimentação e reciclagem asfáltica*. Pernambuco. 2021. Disponível em:< <https://www.tecvia.eng.br/>>. Acesso em Jan. 2021.

TRICHES, G. Misturas Asfálticas Coloridas e as Ilhas de Calor. *Rodovias Verdes- Asfalto em Revista 2ed* . 2015. Disponível em: <<https://rodoviasverdes.ufsc.br/2015/05/22/colored-asphalt-mixtures-and-heat-islands/>>. Acesso 18 de dezembro de 2021.

TRICHÊS, G. *Mistura asfálticas coloridas e a ilha de calor urbano*. *Boletim Técnico do Sindicato da Construção Pesada do Estado de São Paulo*. São Paulo, n.3, 2014.

VASCONCELOS, L. L. C. *Mistura asfáltica com resíduos de PEAD*. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal do Amazonas. Amazonas. 2020.

VEERARAGAVAN, P.R. et al. Investigation on the influence of air voids and active filler on the mechanical response of bitumen stabilized material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 3, p. 04017293, 2018.

VILLENA, J., *Uso de pigmentos de óxidos de metais mistos na pavimentação para a mitigação da Ilha de Calor Urbana*. (Tese de Doutorado) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2014.

WANHONG. Plain Wanhong Road Engineering Co.,Ltd. 2020. Disponível em: <<http://www.pywhdl.com/productinfo/1093233.html>> Acesso 10 jan 2022.

WIDÉN, J., MUNKHAMMAR, J. Theory of solar radiation. *Uppsala University*. V.1. (2019). Suécia.

WIT, W. et al. Solucionar a Poluição Plástica: *Transparência e Responsabilização*. Suíça: WWF–Fundo Mundial para a Natureza. SUIÇA. 2019.

YULIESTYAN, A., et al . Selection of ethylene-vinyl-acetate properties for modified bitumen with enhanced end-performance. 2018. *Rheologica Acta*, 57(1), 71-82.

ZHANG, H. et al. Influence of surface modification on physical and ultraviolet aging resistance of bitumen containing inorganic nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 98, 735–740. 2015.

ZHANG, S., et al. Assimilation of remote sensing data into GIS-based full-sky solar radiation modeling for mountain terrain. *Remote Sensing of the Environment* . 2019.