



**UNIVERSIDADE
E D U A R D O
M O N D L A N E**

Faculdade de Ciências

Departamento de Química

Mestrado em Química e Processamento de Recursos Locais

Dissertação de Mestrado

TEMA:

**Avaliação do efeito da adição do óleo vegetal de Soja sobre
as propriedades do asfalto modificado com polietileno de
alta densidade**

AUTORA: Elizabeth Flávio Langa

Maputo, Julho de 2023



Faculdade de Ciências

Departamento de Química

Mestrado em Química e Processamento de Recursos Locais

Dissertação de Mestrado

TEMA:

**Avaliação do efeito da adição do óleo vegetal de Soja sobre
as propriedades do asfalto modificado com polietileno de
alta densidade**

AUTORA: Elizabeth Flávio Langa

SUPERVISOR: Prof. Doutor Hermínio Muiambo

Maputo, Julho de 2023

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MESTRADO EM QUÍMICA E PROCESSAMENTO DE RECURSOS
LOCAIS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DO ÓLEO VEGETAL
DE SOJA SOBRE AS PROPRIEDADES DO ASFALTO
MODIFICADO COM POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE**

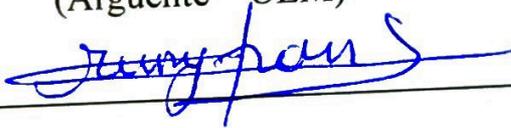
ELIZABETH FLÁVIO LANGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Eduardo Mondlane, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Química e Processamento de Recursos Locais.

Aprovado em 25 de Maio de 2023 por:



Prof. Doutor Alcides Siteo
(Arguente – UEM)



Prof. Doutor François Munyemana
(Presidente do Júri – UEM)



Prof. Doutor Hermínio Muiambo
(Orientador - UEM)

Maputo, Julho de 2023

DEDICATÓRIA

Á minha querida mãe

Melina Xavier Tamele

Pelo amor, carinho, afecto, dedicação e cuidado que me concedeu durante toda a minha existência.

“Não me sinto obrigado a acreditar que o mesmo Deus que nos dotou de sentidos, razão e intelecto, pretenda que não os utilizemos” (Galileu Galilei).

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada e que sem a presença dele, em minha vida, nada seria possível.

À minha família, minha mãe Melina Xavier Tamele, meus irmãos Váldes Langa, Ludmila Langa, Viriato Nhaca e Éder Nhaca cujo amor, apoio e acompanhamento permitiram um crescimento a nível pessoal e intelectual capaz de superar as dificuldades enfrentadas ao longo da vida.

Ao meu supervisor, Prof. Doutor Hermínio Muiambo, cuja dedicação, orientação, espírito crítico e disponibilidade permitiram a elaboração de um relatório pormenorizado e cuidado acerca do tema em questão.

À duas pessoas especiais António Elija e Evelísia Bule pelo amor, incentivo, conselhos, carinho, apoio incondicional e exemplo constante de trabalho, honestidade, esforço e força de vontade.

Aos Mestres Hélder Manguene e Lucas Tamele Júnior pelos bons momentos partilhados durante a realização deste estudo, pela amizade, incentivo, conselhos, apoio e por ajudarem a transformar momentos menos bons em risos e alegria.

À Lic. Ana Machute e Lic. Eugénio Tembe pelo apoio e dedicação ao longo da realização dos ensaios laboratoriais. Aos amigos e colegas do curso de mestrado da edição 2018, pelo companheirismo e apoio.

Ao Eng^o. João Macuácuca e ao Prof. Doutor Alcides Siteo pelo incentivo, conselhos, carinho e apoio.

Ao Departamento de Química da Universidade Eduardo Mondlane, ao Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM), ao *Institute of Applied Materials* (IAM) da Universidade de Pretória, pela colaboração, profissionalismo, apoio e por toda ajuda prestada para permitir o desenvolvimento deste estudo.

Ao FIAM (Fundo para a Investigação Aplicada e Multisectorial) pela concessão da bolsa de mestrado, auxiliando o desenvolvimento desta pesquisa.

À todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim e fazem esta vida valer cada vez mais à pena.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro que esta dissertação nunca foi apresentada para a obtenção de qualquer grau ou num outro âmbito e que ele constitui o resultado do meu labor individual. Esta dissertação é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de mestre, da Universidade Eduardo Mondlane.

Elizabeth Flávio Langa

Elizabeth Flávio Langa

RESUMO

O rápido desenvolvimento económico, o aumento do tráfego e carga resultam em problemas graves de pavimento asfáltico, como a deformação permanente, rachaduras por fadiga e redução do tempo de vida. Os polímeros são vistos como aditivos viáveis no asfalto para minimizar esses problemas. No entanto, sua incorporação tende a reduzir a trabalhabilidade do material devido ao aumento da viscosidade. Além dos polímeros, os óleos também foram considerados para melhorar o desempenho do asfalto. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da adição de óleo de soja sobre as propriedades físicas, reológicas e térmicas do ligante asfáltico modificado com polietileno de alta densidade (HDPE). A percentagem de HDPE usada foi de 5 wt% e o óleo foi variado de 0 a 7 wt%. O desempenho de ligantes asfálticos contendo HDPE e óleo foi avaliado usando testes convencionais (penetração, ponto de amolecimento e ductilidade); testes reológicos (viscosidade dinâmica e envelhecimento de curta duração – RTFO) e análise termogravimétrica (TGA). Os resultados dos testes revelam que a adição de 5 wt% de HDPE reduziu a penetração e aumentou o ponto de amolecimento e a viscosidade. O óleo reduziu a viscosidade e melhorou a trabalhabilidade e a suscetibilidade térmica do asfalto modificado. As curvas TGA revelaram um aumento na estabilidade térmica para amostras com até para 3 wt% de óleo. Segundo os resultados de RTFO o óleo reduziu cerca de 92% do ganho de massa das amostras após o envelhecimento. Assim, o óleo vegetal de soja pode ser considerado um bom aditivo para melhoria da trabalhabilidade do asfalto modificado com polímero em condições de serviço.

Palavras-chave: Asfalto, Óleo vegetal, Soja, HDPE, Reologia, Viscosidade.

ABSTRACT

The economic development, resulting in increased traffic and, thus, higher traffic loads, often cause serious asphalt pavement problems, such as permanent deformation, fatigue cracking, and reduced lifetime. Polymers are seen as viable additives into asphalt to minimize these problems. However, its incorporation tends to reduce the workability of the material due to the increase in the viscosity of the blend. Besides polymers, oils have also been considered to improve asphalt performance. This study aimed to evaluate the effect of the addition of soybean oil on the physical, rheological, and thermal properties of high-density polyethylene (HDPE) modified asphalt binder. The percentage used was 5 wt.% and soybean oil was varied from 0 to 7 wt.% into asphalt. The performance of asphalt binders containing HDPE and soybean oil was evaluated using conventional tests (penetration, softening point and ductility) and rheological performance tests (dynamic viscosity and short-term ageing (RTFO) and thermogravimetric analysis (TGA)). The tests results showed that the addition of 5 wt.% HDPE reduced the penetration and increased the softening point and viscosity. The oil reduced steadily the viscosity and improved the workability and the thermal susceptibility of the modified asphalt. TGA curves revealed an increase in thermal stability for samples with up to 3 wt.% of oil. The oil reduced about 92 % mass gain of the samples after ageing. Hence, soybean vegetable oil was considered a good modifier agent for improvement of polymer modified asphalt workability at service conditions.

Keywords: Asphalt, Vegetable oil, Soybean, HDPE, Rheology, Viscosity.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
SIGLAS E ABREVIATURAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivos.....	3
1.1.1. Objectivo geral.....	3
1.1.2. Objectivos específicos	3
1.2. Problema de pesquisa.....	4
1.3. Relevância do estudo.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Definição e origem do asfalto	6
2.1.1. Fontes de asfalto	6
2.1.2. Composição química do asfalto	7
2.1.3. Estrutura do asfalto	9
2.1.4. Propriedades do asfalto.....	11
2.1.5. Ensaio de caracterização do asfalto.....	13
2.1.6. Especificações para avaliação de Asfaltos.....	16
2.1.7. Pavimentação	17
2.1.8. Terminologia e tipos de defeitos do pavimento asfáltico	18
2.2. Polímeros.....	24

2.2.1.	Classificação dos polímeros.....	24
2.2.2.	Polímeros compatíveis com o asfalto	28
2.2.3.	Processos para a incorporação do polímero ao asfalto	29
2.2.4.	Compatibilidade entre polímero e asfalto	30
2.3.	Óleos vegetais	32
2.3.1.	Óleo vegetal de soja.....	32
2.3.2.	Óleo residual de Cozinha aplicado na pavimentação	35
3.	PARTE EXPERIMENTAL.....	38
3.1.	Materiais usados.....	38
3.2.	Métodos usadosos	39
3.2.1.	Preparação do asfalto modificado por via húmida.....	39
3.2.2.	Ensaio de caracterização do asfalto e dos compósitos AHO.....	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1.	Penetração	48
4.2.	Ponto de amolecimento	49
4.3.	Índice de susceptibilidade térmica (PI)	51
4.4.	Viscosidade	52
4.5.	Ductilidade	54
4.6.	Efeito do envelhecimento oxidativo térmico nas propriedades convencionais.....	55
4.7.	Análise termogravimétrica	58
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	62
5.1.	Conclusões	62
5.2.	Recomendações	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
	ANEXOS	a

SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	Associação Americana de Autoridades Estaduais de Rodovias e Transportes (<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>)
AESO	Óleo de soja acrilado epoxidado (<i>Acrylated Epoxidized Soybean Oil</i>)
AHO	Compósito de Asfalto, HDPE e Óleo de soja
ASTM	Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (<i>American Society for Testing Materials</i>)
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CEN	Comité Europeu de Normalização (<i>Comite Europeen de Normalisation</i>)
CR	Borracha em Pó (<i>Crumb Rubber</i>)
CSIR	Conselho de Investigação Científica e Industrial (<i>Council for Scientific and Industrial Research</i>)
DAR	Taxa de envelhecimento de ductilidade (<i>Ductility ageing ratio</i>)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte
DSR	Reómetro dinâmico de cisalhamento (<i>Dymnamic share rheometer</i>)
DTG	Termogravimetria Diferencial (<i>Differential thermogravimetry</i>)
EMA	Etil Metacrilato
EVA	Etileno acetato de vinila
FIAM	Fundo para a Investigação Aplicada e Multisectoria
HDPE	Polietileno de alta densidade (<i>High density polyethylene</i>)
IAM	Instituto de Materiais Aplicados (<i>Institute of Applied Materials</i>)
LDPE	Polietileno de baixa densidade (<i>Low density polyethylene</i>)
LEM	Laboratório de Engenharia de Moçambique
LLDPE	Polietileno linear de baixa densidade
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Cívil
ORC	Óleo residual de cozinha
PB	Polibutadieno
PE	Polietileno
PI	Índice de Penetração (<i>Penetration Index</i>)
PP	Polipropileno
PPA	Ácido polifosfórico

SIGLAS E ABREVIATURAS

PPC	Concreto de cimento Portland
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
Rpm	Rotações por minuto
RTFO	Envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (<i>Rolling thin film oven</i>)
RTFOT	Teste de envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>)
RV	Viscosidade rotacional
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
SBR	Borracha de estireno butadieno
SBS	Estireno butadieno estireno
SHRP	Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (<i>Strategic Highway Research Program</i>)
SUPERPAVE	Desempenho Superior Desempenho do Pavimento (<i>Superior Performance Pavement Performance</i>)
TFOT	Teste de Forno de Filme Fino (<i>Thin Film Oven Test</i>)
TGA	Análise termogravimétrica
VAI	Índice de envelhecimento de viscosidade (<i>Viscosity ageing index</i>)

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática dos componentes dos asfaltos.....	9
Figura 2. Modelo de micelas de Yen (1991).....	10
Figura 3. Representação esquemática do modelo coloidal do ligante asfáltico: a) tipo sol, b) tipo gel.....	11
Figura 4. Diferentes tipos de trincas no pavimento asfáltico.....	20
Figura 5. Defeitos do pavimento asfáltico.....	23
Figura 6. Estrutura do PE.....	26
Figura 7. Estrutura do HDPE.....	27
Figura 8. Exemplo da estrutura molecular típica encontrada para os triglicerídeos do óleo vegetal extraído da soja.....	33
Figura 9. Estruturas moleculares dos principais ácidos gordos encontrados no óleo de soja.....	34
Figura 10. a) Asfalto puro; e b) HDPE em pó puro.....	38
Figura 11. Óleo vegetal de soja.....	39
Figura 12. Preparação do asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja.....	40
Figura 13. Diagrama ilustrativo do processo de preparação e caracterização do asfalto.....	41
Figura 14. Ensaio de penetração.....	42
Figura 15. Amostras para o ensaio de anel e bola (ponto de amolecimento).....	43
Figura 16. Estufa de filme fino rotativo.....	45
Figura 17. Viscosímetro Brookfield.....	46
Figura 18. Ensaio de ductilidade.....	46
Figura 19. TGA Instrumento Q600 Shimadzu.....	47
Figura 20. Resultados do teste de penetração determinado pelo método convencional.....	48
Figura 21. Resultados de ponto de amolecimento das amostras.....	50
Figura 22. Índice de susceptibilidade térmica.....	51
Figura 23. Resultados do teste de viscosidade dos ligantes a 165°C antes do envelhecimento ...	52
Figura 24. Resultados de teste de ductilidade a 25°C antes do RTFO.....	54
Figura 25. Variação de massa depois do teste de envelhecimento.....	55
Figura 26. Resultados do VAI mostram a propriedade anti-envelhecimento dos ligantes.....	56

Figura 27. Resultados do DAR	57
Figura 28. Termograma do HDPE e do Óleo de soja	58
Figura 29. Termograma para amostras de asfalto puro e Amostras de asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja em atmosfera de N ₂	59
Figura 30. Curvas DTG para amostras de asfalto puro e Amostras de asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja em atmosfera de N ₂	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Métodos de produção de asfalto.....	7
Tabela 2. Análise elementar do asfalto de diferentes fontes.....	8
Tabela 3. Especificação do asfalto para a pavimentação.	16
Tabela 4. Propriedades físicas e mecânicas do HDPE e LDPE.	26
Tabela 5. Polímeros comumente usados em misturas	29
Tabela 6. Composição e propriedades físicas do óleo de soja.	33
Tabela 7. Propriedades físicas do óleo vegetal de soja.	34
Tabela 8. Propriedades do asfalto puro.....	38
Tabela 9. Composição das amostras	39
Tabela 10. Resultados de TGA	61
Tabela A I. Resultados do ensaio de penetração.....	a
Tabela A II. Resultados do ensaio de ponto de amolecimento	b
Tabela A III. Resultados do índice de penetração	c
Tabela A IV. Resultados da viscosidade antes do RTFO	d
Tabela A V. Resultados da viscosidade depois do RTFO	d
Tabela A VI. Ductilidade antes do RTFO	d
Tabela A VII. Ductilidade depois do RTFO	e
Tabela A VIII. Ganho de massa depois do RTFO	e
Tabela A IX. Resultados de VAI	e
Tabela A X. Resultados de DAR	f

1. INTRODUÇÃO

O asfalto é um material viscoelástico produzido como um subproduto durante a decomposição térmica de substâncias orgânicas. A sua propriedade essencial, na construção de estradas, é a capacidade de aderir intensamente à uma superfície agregada e manter a integridade do pavimento durante o seu tempo de vida útil (Jafar, 2016).

Quando exposto ao ar e água o asfalto sofre transformações químicas que levam a um processo de envelhecimento por oxidação. Este é um fenômeno natural que inicia na fase de construção das camadas asfálticas executadas a quente e que se desenvolve ao longo do tempo de vida do pavimento asfáltico (Kim *et al.*, 2009; Manoel, 2015). A principal consequência deste fenômeno de envelhecimento é o endurecimento que é expresso pelo aumento do módulo complexo o que favorece a resistência à deformação permanente nos primeiros meses após a construção (Anderson *et al.*, 1994; Moreno-Navarro *et al.*, 2014).

A busca por asfalto de alta qualidade e a limitação do processo de refino está a impulsionar a pesquisa de ligantes asfálticos reforçados com polímeros. Como forma de garantir o desempenho do asfalto em diferentes ambientes e melhorar ou promover suas propriedades, têm sido utilizados materiais virgens e reciclados, que incluem estireno-butadieno-estireno (SBS), borracha de estireno-butadieno (SBR), borracha (CR), ácido polifosfórico (PPA), resíduos de borracha, polietileno reciclado (PE), resíduos de madeira derivados de bio-óleo, resíduos de plástico, óleo de cozinha residual e óleo de motor residual (Kalantar *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2018; Suo, Yan, *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2014).

Vários autores demonstraram que a viscoelasticidade e a susceptibilidade térmica do asfalto podem ser melhoradas pelo uso de aditivos, especialmente polímeros (Attelmanan *et al.*, 2011; Manoel, 2015; Swamy *et al.*, 2017). De acordo com Becker *et al.* (2001), a adição apropriada de polímeros pode melhorar a qualidade do asfalto. A modificação do asfalto à base de polietileno é cada vez mais usada na engenharia de pavimentação como resposta à crescente demanda por melhor desempenho do pavimento. A formação de fissuras em pavimentos asfálticos pode reduzir a vida útil e comprometer a segurança dos usuários das vias. Nesse sentido, o polietileno de alta densidade (HDPE) é um dos termoplásticos que podem ser utilizados para modificar o asfalto aglutinante e reduzir a deformação permanente (Moghadas e Mohsen, 2014; Moussa *et al.*, 2020).

A estrutura interna do polietileno e o asfalto resultante são de grande interesse devido à sua grande influência no desempenho do pavimento. Eles mostram melhor resistência à corrosão do concreto asfáltico, propriedades mecânicas dos ligantes em alta temperatura, bem como melhor resistência contra a deformação permanente (Liang *et al.*, 2019). Por outro lado, a adição de polímeros ao asfalto conduz a um aumento da viscosidade o que adiciona complicações operacionais principalmente relacionadas à mistura e ao armazenamento (Ghuzlan *et al.*, 2015; Rafiq *et al.*, 2021). A baixa compatibilidade entre asfalto e polímero pode levar à separação de fases quando o material é armazenado em altas temperaturas (160 – 200 °C) na ausência de agitação (Polacco *et al.*, 2005).

Appiah *et al.* (2017) modificaram o asfalto com polietileno PE e polipropileno (PP) e observaram a capacidade destes polímeros de aumentar a viscosidade do asfalto e conseqüentemente aumentar a temperatura de processamento do asfalto modificado. Para reduzir a viscosidade do asfalto e melhorar sua trabalhabilidade, vários aditivos como óleos vegetais reciclados e óleo de motor têm sido aplicados ao asfalto (Joni *et al.*, 2020; Liang *et al.*, 2019; Moussa *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2021). Um estudo realizado por Pereira *et al.* (2021) revelou que, nos últimos anos, também tem havido um maior interesse na aplicação de óleos vegetais como modificadores de ligantes asfálticos. Resultados obtidos por Li *et al.* (2019) demonstraram que o óleo de motor usado e o óleo de cozinha usado podem suavizar e recuperar a trabalhabilidade do asfalto envelhecido de forma eficaz. Uma pesquisa realizada por Portugal (2016) na qual estudou o efeito da incorporação do óleo de soja e de milho novo e residual no asfalto revela que a utilização de óleo de soja e óleo de milho (novo e residual) contribui positivamente para a diminuição da viscosidade das misturas com uma conseqüente diminuição da temperatura de usinagem e compactação das misturas estudadas. Observou ainda que não existem diferenças significativas na utilização de óleo novo ou residual. Barros *et al.* (2017) avaliaram as propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição de óleo de soja e óleo de milho novos e reciclados. Os seus resultados mostraram que a adição de óleos tende a reduzir a força máxima das misturas asfálticas, rigidez e resistência à deformação permanente e não há diferenças significativas no uso de óleo residual e óleo novo. Assim, a vantagem do uso de óleo residual é apenas do ponto de vista do impacto ambiental. Actualmente ao mesmo tempo em que se busca melhorar a qualidade do asfalto, procura-se também reduzir o nível de poluição causado pelo descarte inadequado de resíduos poliméricos e óleos vegetais residuais.

Muitos pesquisadores realizaram vários experimentos laboratoriais relacionados ao efeito do HDPE e os óleos vegetais nas características dos ligantes modificados. Entretanto, poucos estudos experimentais foram realizados para avaliar o efeito da modificação simultânea do asfalto utilizando HDPE e óleo vegetal. Nesta pesquisa o efeito do HDPE puro e do óleo vegetal de soja novo nas propriedades físicas, reológicas e térmicas dos ligantes asfálticos foi investigado através dos seguintes testes: penetração, anel e bola, viscosidade a 165°C, ductilidade, teste de envelhecimento a curto prazo RTFO (*rolling thin film oven*) e análise termogravimétrica (TGA). Estes testes fornecem informações valiosas sobre o desempenho dos ligantes asfálticos modificados durante a fase de compactação e aplicação.

De acordo com (Kalantar *et al.*, 2012; Rahman e Wahab, 2013) o uso de polímeros reciclados como modificadores de asfalto (<10 wt%) ou como extensores (10-75 wt%) deve reduzir a proporção de asfalto e os custos envolvidos, reduzir aterros, poluição subsequente e melhorar o desempenho das estradas. Resultados obtidos neste estudo fornecerão dados valiosos para a aplicação destes aditivos na forma reciclada. A incorporação de material reciclado traz uma revolução altamente sustentável por apresentar vantagens económicas e ambientais.

1.1. Objectivos

1.1.1. Objectivo geral

- Avaliar o efeito da adição do óleo vegetal de soja sobre as propriedades do asfalto modificado com polietileno de alta densidade (HDPE) para aplicação na pavimentação flexível.

1.1.2. Objectivos específicos

- Preparar compósitos de asfalto com 5 wt% de HDPE puro, e óleo vegetal de soja novo com teores de 0 – 7 wt%, pelo método de via húmida;
- Caracterizar as amostras preparadas e o asfalto virgem pelos ensaios de penetração, anel e bola, viscosidade a 165°C, ductilidade, teste de envelhecimento a curto prazo (RTFO) e análise termogravimétrica (TGA); e
- Analisar a influência da adição do óleo vegetal de soja sobre as propriedades mecânicas, térmicas e reológicas dos compósitos obtidos.

1.2. Problema de pesquisa

Em muitos casos as misturas asfálticas produzidas com asfalto convencional não apresentam as propriedades desejáveis: boa propriedade de ligação coesiva e adesiva, propriedade repelente de água e a sua natureza termoplástica, o que torna o asfalto não útil. Por outro lado, os asfaltos convencionais sofrem alterações causadas por diversos factores tais como a temperatura, a água, oxidação, além do alto custo de aquisição do asfalto por este ser um subproduto do petróleo. Estes e outros factores desencadeiam uma busca constante por novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos asfálticos, como por exemplo, os asfaltos modificados por polímeros e óleos. A adição de polímeros ao asfalto demonstrou melhorar o desempenho do asfalto. Pavimentos modificados com polímeros apresentam maior resistência à formação de sulcos e trincas térmicas, menor dano por fadiga, descascamento e suscetibilidade às variações de temperatura. Por outro lado, a modificação com polímeros traz algumas desvantagens relacionadas com a baixa compactibilidade, separação de fases, instabilidade e aumento da viscosidade, bem como aumento da temperatura de processamento, o que demanda maior quantidade de energia. Como forma a minimizar esses efeitos negativos são aplicados alguns agentes compactibilizantes. O uso de asfaltos modificados por polímeros e óleos pode melhorar sua propriedade de ligação (aglutinante), reduzir a viscosidade, aumentar o tempo de vida e de serviço dos pavimentos em locais de difícil acesso ou de custo muito elevado de interrupção do tráfego para intervenções de manutenção, assim como reduzir a frequência das manutenções.

1.3. Relevância do estudo

Em Moçambique o sistema rodoviário é o principal sistema de transporte. Mas, apesar de ser extremamente importante para o funcionamento de todo o país, especialmente para as actividades económicas, a quantidade de patologias nessas estradas é enorme e a qualidade delas muitas vezes deixa a desejar.

Assim, como muitos países africanos, Moçambique enfrenta sérios problemas em termos de quantidade e qualidade da sua rede rodoviária. A maioria das vias de acesso não está ainda asfaltada e ficam praticamente intransitáveis durante o período chuvoso. O clima local (húmido e extremamente quente no verão) também dificulta a manutenção das poucas vias disponíveis. A água (da chuva) é o principal agente da degradação das estradas asfaltadas e responsável pelo seu curto tempo de vida.

A modificação do asfalto por polímeros tem sido uma solução para suprir algumas deficiências do asfalto e melhorar propriedades como a susceptibilidade térmica, resistência à deformação permanente e às trincas térmicas. Este estudo está voltado para o polímero HDPE por ser um dos polímeros mais produzidos a nível do mundo, por apresentar baixo custo de produção e aquisição, a sua força e resistência mecânica, durabilidade e longa vida, baixo peso, excelente barreira contra água e gases, resistência à maioria dos agentes químicos, excelente processabilidade, bem como a baixa taxa de reciclagem. O óleo vegetal de soja é um dos mais usados em Moçambique e pouco se sabe sobre os procedimentos empregues para o seu descarte. Na maioria dos casos é descartado junto do lixo doméstico e acaba desaguando no mar ou rios poluindo as águas.

Este estudo surge como uma resposta sustentável aos problemas enfrentados com a qualidade do pavimento asfáltico, bem como aos desafios enfrentados no descarte de materiais poliméricos e óleo residual ao ambiente.

O estudo é realizado no âmbito de um projecto que tem como objectivo final melhorar as propriedades do asfalto aplicado na pavimentação pela incorporação de materiais reciclados de baixo custo e conseqüente melhoria da qualidade da rede rodoviária. Este é um estudo pioneiro em Moçambique, e nesta fase pretende-se usar o HDPE puro e óleo vegetal de soja novo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição e origem do asfalto

Dependendo da aplicação e da origem, o asfalto tem diferentes nomes, definições e descrições. É um material que apresenta uma cor preta, pegajoso, semi-sólido usado na pavimentação. Na América do Norte é chamado de ligante asfáltico ou cimento asfáltico e no resto do mundo é chamado de betume. De acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) cimento asfáltico é definido como um material preto acastanhado ou simplesmente preto que ocorre na natureza ou é obtido pela refinação do petróleo bruto, onde o material predominante é o betume (Brûlé, 1996). É, portanto, um material viscoelástico produzido como um subproduto durante a decomposição térmica de substâncias orgânicas (Jafar, 2016).

De acordo com Bernucci *et al.* (2010) diferentes designações são usadas quando se faz referência ao material betuminoso:

- Betume: comumente é definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono;
- Asfalto: mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção;
- Alcatrão: é uma designação genérica de um produto que contém hidrocarbonetos, que se obtém da queima ou destilação destrutiva do carvão, madeira e outros.

Neste estudo será usada a designação asfalto.

2.1.1. Fontes de asfalto

Os asfaltos podem ser de origem natural, de alcatrão e de petróleo.

Os cimentos asfálticos naturais são depósitos formados pelo petróleo que surgem na superfície da terra e sofrem uma destilação natural pela ação do vento e do sol, que retiram os gases e óleos leves, deixando um resíduo que é o asfalto natural. Os asfaltos naturais são encontrados principalmente em Trinidad, Venezuela, Iraque, EUA (Califórnia do Sul) e outros locais no mundo. Estima-se que existem cerca de 2.7×10^{12} barris de asfalto. Outras fontes de asfalto natural são rochas e Gilsonites.

O alcatrão é produzido pela queima de material orgânico como tabaco, madeira ou carvão. A maioria dos alcatrões utilizados na pavimentação são subprodutos da destilação destrutiva do carvão. O carvão é aquecido a 1000°C, produzindo o coque que dá origem ao alcatrão bruto. O alcatrão produzido pela combustão do carvão é um material que deve ser refinado, produzindo um líquido com propriedades físicas semelhantes ao do cimento asfáltico, porém com propriedades químicas muito diferentes, uma vez que este possui muitos compostos carcinogênicos.

Os asfaltos de petróleo são obtidos da refinação do petróleo bruto, uma mistura complexa de diferentes hidrocarbonetos. A produção do asfalto a partir do petróleo bruto foi iniciada nos EUA em 1902. Alguns métodos usados para produzir e processar materiais asfálticos são mostrados na tabela 1 (Gotame, 2016):

Tabela 1. Métodos de produção de asfalto

Processo	Material base	Produto
Destilação a vácuo	Asfalto bruto	Cimento asfáltico
Emulsificação	Asfalto, agente emulsificante e água	Asfalto emulsificado
Modificação	Asfalto e modificadores (polímeros e químicos)	Asfaltos modificados
Extração com solvente	Resíduo a vácuo	Componentes de asfaltos (asfaltenos, resinas e óleos)

2.1.2. Composição química do asfalto

A composição do asfalto depende da origem do petróleo bruto. No geral, o asfalto é uma mistura química complexa de moléculas, entre hidrocarbonetos aromáticos, policíclicos condensados, com cerca de 100 – 200 átomos de carbono. Para além do carbono (82 wt%) e hidrogénio (8 – 11 wt%), também fazem parte da composição uma pequena percentagem de heteroátomos como o nitrogénio (0 – 1 wt%), enxofre (0 – 6 wt%) e oxigénio (0 – 1.5 wt%), além de quantidades traço de metais como o vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio, usados para identificar a fonte do asfalto (Bernucci *et al.*, 2010; Gawande *et al.*, 2012).

Geralmente o asfalto contém 3 tipos básicos de moléculas: alifáticas, cíclicas e aromáticas. As moléculas alifáticas são oleosas por natureza, possuem cadeias lineares, tridimensionais, também

chamadas de parafinas. As moléculas cíclicas são chamadas nafténicas, que são anéis saturados tridimensionais de átomos de carbono com vários átomos ligados a ela (Read e Whiteoak, 2003).

A Tabela 2 apresenta a composição elementar de diferentes tipos de asfalto (Institute Asphalt, 2015)

Tabela 2. Análise elementar do asfalto de diferentes fontes

Elementos						
Intervalo	Carbono, wt%	Hidrogénio, wt%	Nitrogénio, wt%	Enxofre, wt%	Oxigénio, wt%	Níquel, ppm
	80.2 – 84.3	9.8 – 10.8	0.2 – 1.2	0.9 – 6.6	0.4 – 1.0	10 – 139
Elementos						
Intervalo	Vanádio, ppm	Ferro, ppm	Manganês, ppm	Cálcio, ppm	Magnésio, ppm	Sódio, ppm
	7 – 1590	5 – 147	0.1 – 3.7	1 – 335	1 – 134	6 – 159

Resinas – contêm carbono e hidrogénio com enxofre, oxigénio e nitrogénio em pequenas quantidades. São substâncias polares usadas como agentes peptizadores e dispersantes para asfaltenos. Apresentam uma cor preta e são fortemente adesivos ao agregado na pavimentação. A proporção de resinas para asfaltenos no asfalto rege o seu comportamento sol-gel. A massa molecular da resina varia de 500 a 50 000 g/mol. As resinas são solúveis em n-heptano.

Compostos aromáticos – contêm compostos aromáticos nafténicos de menor massa molecular no asfalto e fornecem um meio de dispersão para os asfaltenos peptizados. A massa molecular média dos compostos aromáticos varia de 300 a 2 000 g/mol.

Compostos saturados – contêm hidrocarbonetos alifáticos de cadeia linear e ramificada com alquil-naftenos e alquil-aromáticos. São de natureza não-polar, com uma massa molecular média que varia de 300 a 2 000 g/mol. Contêm compostos saturados cerosos e não-cerosos e sua fracção forma 5 a 20% do asfalto. A Figura 1 ilustra a representação esquemática dos componentes dos asfaltos.

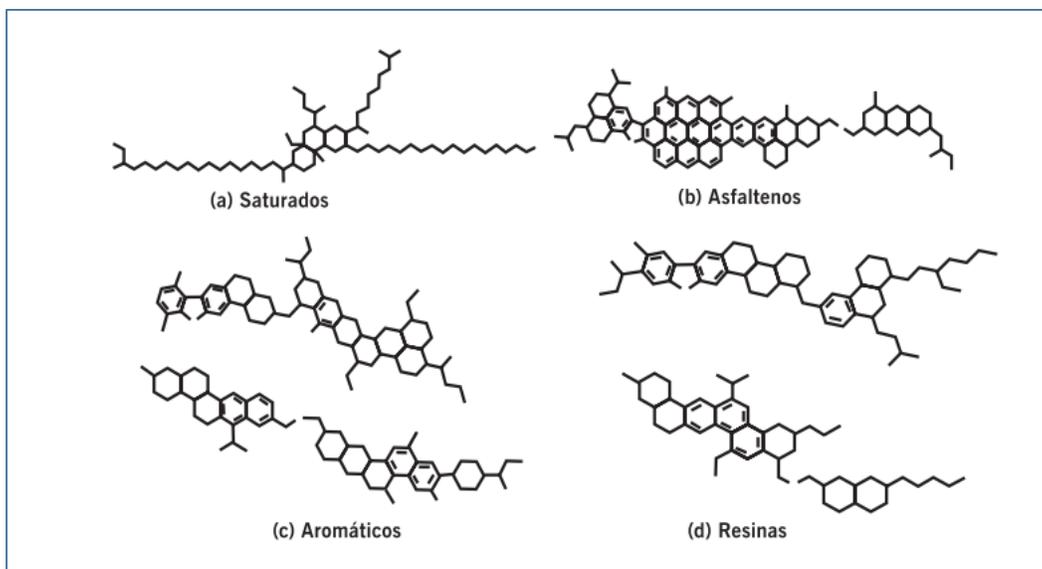


Figura 1. Representação esquemática dos componentes dos asfaltos. Fonte: (Bernucci *et al.*, 2010)

As fracções de compostos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos afectam directamente as propriedades reológicas do asfalto. À temperatura constante, a viscosidade do asfalto aumenta à medida que a concentração de asfaltenos aumenta. Em contraste, a adição de teor de resinas aumenta a viscosidade do asfalto. O comportamento viscoelástico do asfalto pode ser explicado pelos modelos de mola e painel. Todas as moléculas presentes num asfalto contêm duas categorias funcionais, isto é, grupo polar e não polar. As moléculas polares formam uma rede e dão o comportamento elástico do asfalto, enquanto as moléculas não polares de alto peso molecular contribuem para as propriedades viscosas. Espera-se que os componentes polares e não polares devam existir de forma equilibrada para o melhor desempenho em serviço. A baixas temperaturas, o asfalto com grandes quantidades de moléculas apolares pode criar fragilidade, enquanto o alto teor de polaridade pode dar mais flexibilidade ao asfalto (Jafar, 2016).

2.1.3. Estrutura do asfalto

De acordo com Bernucci *et al.* (2010) o asfalto é tradicionalmente considerado uma dispersão, que consiste em micelas de asfaltenos de alta massa molecular dispersas ou dissolvidas em um meio oleoso de baixa massa molecular (maltenos). As micelas são consideradas uma bainha absorvida de resinas aromáticas de alta massa molecular que actuam como uma camada estabilizadora de solvatação. Afastando-se do centro da micela, ocorre uma transição gradual para resinas

aromáticas menos polares, estendendo-se essas para fora até o meio de dispersão oleosa menos aromático. O modelo das micelas está representado na Figura 2.

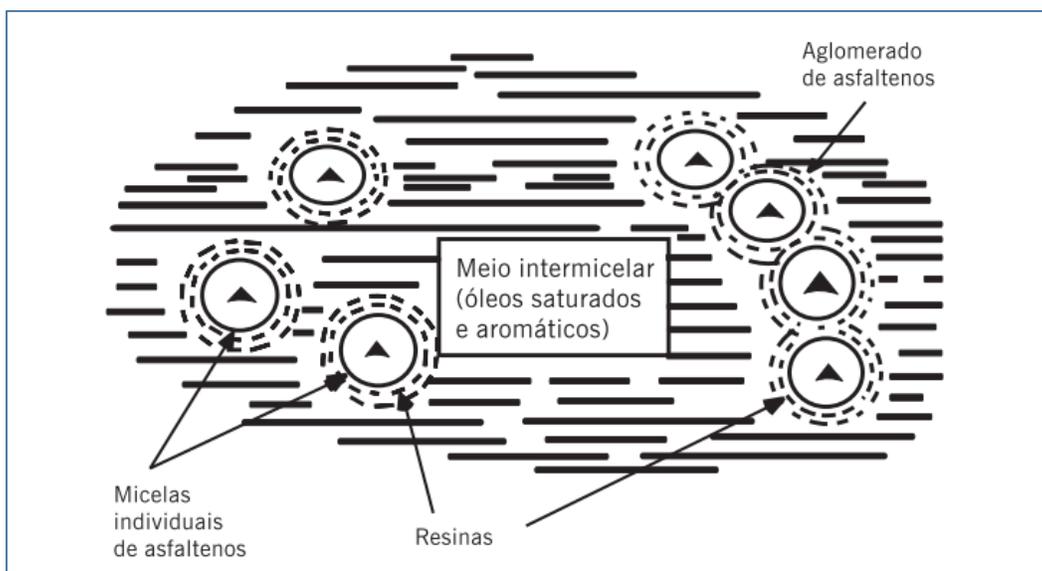


Figura 2. Modelo de micelas de Yen (1991). Fonte: (Bernucci *et al.*, 2010)

Na presença de quantidade suficiente de resinas e aromáticos de poder solvatante adequado, os asfaltenos são totalmente peptizados e as micelas resultantes têm boa mobilidade dentro do asfalto. Estes são conhecidos como asfaltos do tipo “SOL” (Figura 3a). Se a fração aromática não estiver presente em quantidade suficiente para peptizar as micelas, ou tem poder de solvatação insuficiente, os asfaltenos podem se associar ainda mais. Isso pode levar a uma estrutura irregular compactada de micelas ligadas em que os vazios internos são preenchidos com um fluído intermicelar de constituição mista. Esses asfaltos são conhecidos como tipos “GEL” (Figura 3b).

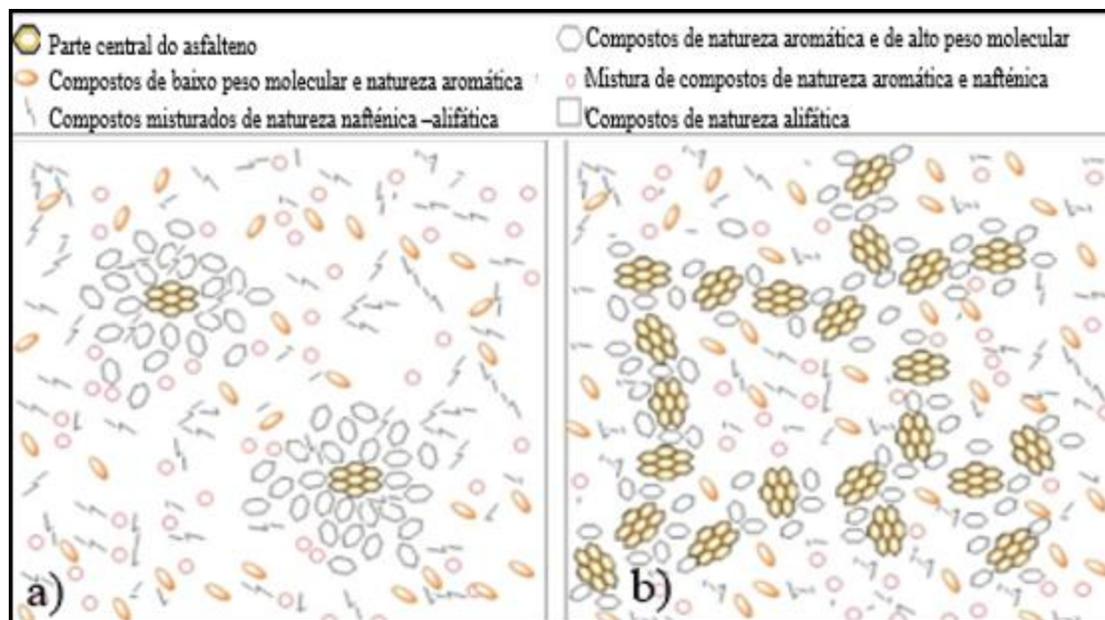


Figura 3. Representação esquemática do modelo coloidal do ligante asfáltico: a) tipo sol, b) tipo gel. Fonte: (Behnood e Gharehveran, 2019).

2.1.4. Propriedades do asfalto

As propriedades físicas do asfalto resultam da sua composição química. De um modo geral e simples o asfalto é caracterizado pelas suas propriedades físicas (Speight, 2016).

2.1.4.1. Propriedades físicas do asfalto

As propriedades físicas mais importantes do asfalto são a durabilidade, adesão e coesão, susceptibilidade térmica, endurecimento e envelhecimento (Read e Whiteoak, 2003; Speight, 2016).

- **Durabilidade** – mede a habilidade do asfalto reter suas características originais depois de um longo período. A durabilidade dos ligantes asfálticos depende do desempenho do pavimento, e esta pode ser medida no laboratório pelo teste de forno de filme fino (*Thin Film Oven Test* - TFOT) e teste de envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (*Rolling Thin Film Oven Test* -RTFOT).
- **Adesão e coesão** – a adesão é a capacidade do asfalto de ligar-se ao agregado na mistura de pavimentação. Coesão é a capacidade do asfalto para manter as partículas de agregado firmemente no lugar no pavimento acabado. A perda de adesão e coesão ocorre quando a

água interage ou penetra na interface entre asfalto e agregado. Podem ser medidos pelo teste de ductilidade.

- **Susceptibilidade térmica** – a susceptibilidade térmica é uma propriedade dos ligantes asfálticos, que indica a influência das variações de temperatura na consistência do ligante asfáltico. A susceptibilidade térmica desempenha um papel vital nas propriedades físicas do asfalto. Os ligantes de asfalto são de natureza termoplástica, isto é, tornam-se mais duros (mais viscosos) à medida que a sua temperatura diminui e mais macios (menos viscosos) nos seus aumentos de temperatura.
- **Envelhecimento e endurecimento** – o asfalto endurece durante a mistura, transporte, construção e no pavimento em serviço. O endurecimento do asfalto é a principal causa de rachaduras de baixa temperatura no pavimento flexível. A principal causa de endurecimento é a oxidação. O endurecimento físico também ocorre a baixas temperaturas devido às suas mudanças estruturais, como cristalização de cera, agregação de asfaltenos e relaxamento de volume.

2.1.4.2. Propriedades químicas

A estrutura interna de um asfalto é geralmente prevista pela constituição química das espécies moleculares presentes no mesmo. Basicamente, o asfalto é composto por vários hidrocarbonetos, pequenas quantidades de heteroátomos e vestígios de alguns metais. Quando o asfalto é dissolvido em n-heptano os maltenos se dissolvem e os asfaltenos precipitam (Gotame, 2016; Speight, 2016). Maltenos são líquidos viscosos compostos por resinas e óleos. Normalmente, as resinas são líquidos pesados de cor castanha escura que proporcionam aderência ao asfalto, enquanto os óleos de cor clara agem como um meio no qual os asfaltenos e as resinas são transportados. A mudança na proporção de maltenos e asfaltenos altera as propriedades do asfalto. Existem vários factores responsáveis por alterar as proporções de maltenos e asfaltenos, nomeadamente:

- Altas temperaturas;
- Exposição ao oxigénio e radiação solar;
- Tipos de agregados utilizados na mistura de pavimentos; e
- Espessura do filme de asfalto nas partículas de agregado.

As mudanças que ocorrem na proporção de maltenos e asfaltenos é devido à evaporação de componentes mais voláteis, oxidação, polimerização e outras reações químicas.

2.1.4.3. Natureza viscoelástica do asfalto

O desempenho do asfalto é governado pelas suas propriedades viscoelásticas, e é caracterizado usando o comportamento de tensão dos materiais em resposta à carga. A natureza viscoelástica do aglutinante de asfalto depende das condições climáticas, como temperatura e tempo de carregamento. O asfalto comporta-se como material puramente elástico a baixas temperaturas e material viscoso a temperaturas intermediárias. Mas a altas temperaturas ele tende a fluir tão livremente quanto outros líquidos, indicando sua natureza viscosa. Um material elástico tem a capacidade de resistir a um esforço de distorção e retornar à sua forma original quando a tensão é libertada (Gawande *et al.*, 2012; Read e Whiteoak, 2003).

2.1.5. Ensaios de caracterização do asfalto

2.1.5.1. Ensaios convencionais

Os ensaios físicos do asfalto podem ser categorizados em ensaios de consistência, de durabilidade, de pureza e de segurança (Bernucci *et al.*, 2008). Os ensaios convencionais estão descritos em diferentes normas de acordo com cada país ou região. A seguir estão descritos alguns dos principais métodos para a caracterização:

- **Ensaios de penetração:** este ensaio permite medir a consistência do material asfáltico pela penetração de uma agulha de dimensões padronizadas, em décimos de milímetros, submetida a uma carga preestabelecida por determinado tempo e temperatura. O ensaio de penetração está padronizado pela norma ASTM D005 (Botaro *et al.*, 2006).
- **Ensaio de ponto de amolecimento (anel e bola):** este ensaio visa medir a evolução da consistência do material asfáltico, na medida em que a temperatura é alterada, e indica a que níveis de dureza os asfaltos tem uma certa consistência. Pode ser comparado ao ponto de fusão de um material puro (Bernucci *et al.*, 2008).
- **Índice de susceptibilidade térmica:** este ensaio é feito para verificar a influência das variações do asfalto, correlacionando os dados obtidos, para os ensaios de penetração e ponto de amolecimento (Botaro *et al.*, 2006). Ele indica a sensibilidade da consistência dos ligantes em relação à temperatura ambiente. Essa é, talvez, a propriedade mais importante dos asfaltos, pois é através dela que se analisa a influência da temperatura nas propriedades mecânicas da pavimentação (Lucena, 2005).

- **Ductilidade:** é definida como a distância, em “cm”, que um fio de asfalto se rompe após ser esticado a uma determinada temperatura e velocidade. Mede-se também a variação deste parâmetro antes e após o ensaio na estufa. O equipamento onde se realiza é denominado de ductilômetro (Lucena, 2005).
- **Teste de envelhecimento de asfaltos (RTFOT):** o envelhecimento de asfaltos em estufa de filme fino rotativo é um ensaio que simula o processo de usinagem. Os factores que podem ser considerados para o envelhecimento do asfalto são os efeitos da luz, água, reações químicas com os agregados, deterioração microbiológica e absorção dos componentes pesados do asfalto na superfície dos agregados. O envelhecimento oxidativo durante o tempo de serviço de um revestimento asfáltico também pode ser acelerado devido à influência de uma alta taxa de vazios da mistura (macroporos), permitindo uma maior circulação de ar, água e luz (Lucena, 2005).
- **Viscosidade rotacional (RV):** mede a viscosidade dinâmica dos ligantes a temperaturas mais elevadas em um viscosímetro tipo Brookfield (Teixeira, 2018). A viscosidade é a caracterização da capacidade do asfalto de resistir à deformação de cisalhamento sob força externa. A viscosidade do asfalto a 135 °C reflecte as temperaturas de mistura e compactação da mistura asfáltica (Chen *et al.*, 2014). Este ensaio é importante para o momento de aplicação do material ligante com os agregados, pois é necessário saber como ocorre o escoamento e as temperaturas de usinagem e compactação.

De acordo com Błażejowski *et al.* (2014) a viscosidade do asfalto é uma das propriedades de processo e serviço mais importantes. Os asfaltos são líquidos complexos em termos reológicos e a sua viscosidade pode variar dependendo de:

- Mudança de temperatura;
- Taxa de cisalhamento;
- Duração do teste;
- Método de teste;
- Conjunto de teste usado em um determinado método.

Em outras palavras, isso significa que a comparabilidade da viscosidade determinada por diferentes métodos de teste pode ser mantida apenas se as condições de medição específicas forem rigorosamente cumpridas (a mesma temperatura, conjuntos de teste adequadamente selecionados,

taxa de cisalhamento, duração do teste). Em outros casos, a comparação e substituição dos resultados do teste de viscosidade é incorreta e pode levar a conclusões não reais.

2.1.5.2. Análise térmica

O termo análise térmica faz referência à análise de uma mudança de propriedades da amostra, que está relacionada à temperatura. Estas análises são realizadas com o objectivo de avaliar as propriedades físicas em função da temperatura (Mohomed, 2016; Sichina, 2011).

De acordo com Brown (1989) e Fedelich *et al.* (2013) as propriedades físicas podem ser monitoradas de diferentes formas: valor absoluto da propriedade, diferença entre uma propriedade da amostra em relação a uma referência e taxa de mudança da propriedade avaliada quando a temperatura é alterada. As formas para conduzir o experimento podem ser:

Dinâmica: onde a amostra é submetida a um aquecimento ou resfriamento a uma taxa constante (varredura) e monitoram-se as propriedades em função da temperatura.

Isotérmica: a amostra é mantida a temperatura constante e monitoram-se as propriedades em função do tempo.

Análise termogravimetria (TGA) – consiste no monitoramento das massas em função da temperatura (no modo varredura) ou em função do tempo (no modo isoterma). Este método permite fazer a determinação precisa de temperaturas para as quais iniciam-se os processos de decomposição e oxidação, e a temperatura em que a velocidade de decomposição ou oxidação é máxima. São vários os factores que podem interferir na TGA, nomeadamente: factores instrumentais dos quais fazem parte a atmosfera, a geometria do forno e o porta-amostras, bem como a taxa de aquecimento. Para além destes existem os factores relacionados à característica das amostras que são a quantidade, contacto da amostra com a atmosfera, tamanho das partículas, a natureza da amostra e a conductividade térmica (Banerjee, 1993; Hatakeyama e Quinn, 1999).

2.1.5.3. Análise reológica

A reologia é definida como o estudo da deformação e do fluxo da matéria, analisando a resposta dos materiais à força aplicada aos mesmos. Esta resposta pode ser um fluxo viscoso irreversível, deformação elástica reversível, ou uma combinação dos dois. O controlo da reologia é essencial para a manufactura e manuseamento de muitos materiais e produtos e constitui-se particularmente importante na indústria dos polímeros, nomeadamente para os termoplásticos, pois estes polímeros são fundidos por aquecimento e modelados por fluxo através de moldes, solidificando

posteriormente na forma de produtos finais. Por esta razão, é de suprema importância o conhecimento do comportamento do fluxo do material, sendo que este comportamento depende da própria estrutura do material e das suas condições de processamento (Calado, 2015).

2.1.6. Especificações para avaliação de Asfaltos

Os asfaltos são oferecidos comercialmente em várias faixas padronizadas de consistência (tipos ou graus). As especificações padronizadas são desenvolvidas por órgãos específicos para uma determinada região. Os órgãos de padronização mais conhecidos são *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, *Comite Europeen de Normalisation (CEN)* e *ASTM* (Institute Asphalt, 2015; Lucena, 2005). Os asfaltos de petróleo podem ser classificados segundo a sua viscosidade e penetração. Além destes dois métodos de classificação dos asfaltos, em 1987 foi estabelecido o *Strategic Highway Research Program (SHRP)* num congresso dos EUA para desenvolvimento de um novo método de avaliação dos ligantes, conhecido por *Superpave – Superior Performance Pavement*, que tem como objectivo melhorar o desempenho dos pavimentos (Read e Whiteoak, 2003; Silva, 2011).

Na Tabela 3 são apresentados vários padrões Europeus relevantes ao desempenho de asfaltos para pavimentação.

Tabela 3. Especificação do asfalto para a pavimentação.

	Unidade	Designação do grau					
Penetração, 25 °C	dmm	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100
Ponto de amolecimento	°C	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100
Resistência ao endurecimento, 163 °C		55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51
Varição de massa	%	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8
Penetração retida	%	55	53	53	50	50	46
Ponto de amolecimento após envelhecimento	°C	57	54	52	49	48	45
Ponto de inflamação, mínima	°C	240	240	240	230	230	230
Solubilidade, mínima	% (m/m)	99	99	99	99	99	99

Fonte: (Blazejowski et al., 2021)

A norma LNEC E 80 em vigor no Laboratório de Engenharia de Moçambique (LEM) classifica o asfalto de acordo com o valor máximo e mínimo de penetração em quatro grupos, nomeadamente: 35/50, 50/70, 70/100 e 100/150 (LNEC, 1997). Este par de valores são os limites inferiores e superiores permitidos para a penetração, medida em décimos de milímetro.

2.1.6.1. Especificação para asfalto modificado com polímero

As especificações ASTM desenvolvidas para prover referências para especificação de asfalto modificado por polímero reflectem as propriedades de produtos comerciais atualmente disponíveis, não sendo especificações baseadas em desempenho. Nas normas ASTM consta que o asfalto modificado por polímero deverá ser homogêneo, livre de água e não espumar quando aquecido a 175 °C. E, ainda, o polímero modificador e o asfalto deverão ser pré-misturados e dispersos uniformemente antes do uso. Os ensaios são praticamente os mesmos dos asfaltos puros (Lucena, 2005).

2.1.7. Pavimentação

A pavimentação é um sistema com multicamadas que distribui as cargas dos veículos por uma área maior. Isso ajuda a torná-los duráveis e capazes de suportar o tráfego e o meio ambiente. O pavimento consiste em três camadas básicas: a fundação, a sub-base e a base (uma camada de pavimento) que consiste em tapete betuminoso (Alaamri *et al.*, 2017).

Existem várias razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação, sendo as principais: proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante, é durável e resistente à acção da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos (Bernucci *et al.*, 2010).

Os pavimentos são normalmente divididos nas três categorias gerais a seguir: flexíveis, rígidos e não pavimentados (Adlinge e Gupta, 2009).

Pavimentos flexíveis: o material mais comum para esse tipo de pavimento é o asfalto (Bernucci *et al.*, 2008). Os pavimentos flexíveis são constituídos por várias camadas de material granular natural coberto com uma ou mais camadas superficiais betuminosas impermeáveis e, como o nome indica, são considerados flexíveis. Um pavimento destes flexionará (dobrará) sob a carga de um pneu. O objectivo com o projeto de um pavimento flexível é evitar a flexão excessiva de qualquer

camada, a falha em conseguir isso resultará na sobretensão de uma camada, o que, em última análise, fará com que o pavimento falhe. Em pavimentos flexíveis, o padrão de distribuição de carga muda de uma camada para outra, pois a resistência de cada camada é diferente. O material mais forte (menos flexível) está na camada superior e o material mais fraco (mais flexível) está na camada inferior (Adlinge e Gupta, 2009).

Pavimentos rígidos (concreto): Os pavimentos rígidos são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (PCC). Tais pavimentos são substancialmente "mais rígidos" do que os pavimentos flexíveis devido ao alto módulo de elasticidade do material PCC. Além disso, esses pavimentos podem ter aço de reforço, que geralmente é usado para reduzir ou eliminar juntas. A maior rigidez do concreto permite que a camada superficial de concreto cubra pequenas áreas fracas na camada de suporte através do que é conhecido como ação de viga. Isso permite a colocação de pavimentos rígidos em camadas de suporte relativamente fracas, desde que as partículas de material da camada de suporte não sejam levadas pela água forçada para cima pela ação de bombeamento das cargas das rodas (Adlinge e Gupta, 2009).

2.1.8. Terminologia e tipos de defeitos do pavimento asfáltico

A deterioração do pavimento é o processo pelo qual o desgaste (defeitos) se desenvolve no pavimento sob os efeitos combinados da carga de tráfego e das condições ambientais (Adlinge e Gupta, 2009; Singh e Kumar, 2021).

A deterioração tem duas causas gerais: ambiental devido à desagregação e envelhecimento, e estrutural causada por carregamentos repetidos de tráfego, circulação de veículos com excesso de peso e uso de material de construção de baixa resistência e qualidade (Ziliute *et al.*, 2008).

Os defeitos mais comuns em pavimentos flexíveis são trincas/rachaduras ou fissuras que dependem do número de ciclos de carregamento, tamanho da tensão do pavimento e características mecânicas do asfalto. As trincas representam até 70% de todos os defeitos e são dos mais significativos na deterioração do pavimento.

As trincas de pavimentos asfálticos podem ser divididas em 2 grupos relacionando à fadiga de pavimentação e relacionado com o impacto do tempo e do clima (Bernucci *et al.*, 2010; Ziliute *et al.*, 2008). De acordo com Ziliute *et al.* (2008) o primeiro grupo - rachaduras estruturais - emerge no pavimento devido ao impacto das cargas de tráfego e resistência incompleta da estrutura do

pavimento. No início aparecem como pequenas rachaduras longitudinais em sulcos. Estas surgem mais frequentemente quando, na construção das camadas do pavimento, os requisitos tecnológicos não são totalmente implementados. O segundo grupo - rachaduras térmicas – é causado pela variação de temperatura. Sob condições climáticas favoráveis, tais rachaduras não tendem a emergir.

2.1.8.1. Trincas longitudinais

As trincas longitudinais ocorrem de forma isolada e são causadas devido à má execução da junta de construção, reflexão de trincas, assentamento da fundação, retracção do revestimento de asfalto ou estágio inicial de fadiga. Este tipo de patologia se caracteriza como um defeito funcional (Adlinge e Gupta, 2009; Bernucci *et al.*, 2008).

2.1.8.2. Trincas transversais

São formadas devido à reflexão de juntas ou de trincas subjacentes ou retração do revestimento asfáltico, que aparecem isoladas e são perpendiculares ao eixo do pavimento. A desagregação dos bordos dá início à evolução da trinca, seguindo com a penetração de água e enfraquecimento das camadas inferiores. É um defeito funcional (trincas grandes causam irregularidade) e estrutural (enfraquecem o revestimento do pavimento) (Adlinge e Gupta, 2009; Diltata Dilgba, 2018; Singh e Kumar, 2021).

2.1.8.3. Trinca de bordo

A trinca de bordo é aquela formada devido ao acostamento não pavimentado, pois há humidade excessiva das camadas ou baixa espessura da camada de revestimento e base. Está situada no máximo a 60 cm da borda (Bernucci *et al.*, 2008; DNIT, 2005).

2.1.8.4. Trinca por reflexão

As trincas por reflexão ocorrem quando existem trincas nas camadas inferiores que se alastram em direcção ao revestimento e o mesmo padrão que o defeito apresenta nas camadas inferiores é mantido em sua reflexão na superfície, sendo capaz de se manifestar em formato de trinca longitudinal, irregular ou interligada (Bernucci *et al.*, 2008; DNIT, 2005).

2.1.8.5. Trincas em blocos

As trincas em blocos são fissurações interconectadas que formam grandes blocos. As rachaduras geralmente se cruzam em ângulos quase rectos. Os blocos podem variar de um pé a aproximadamente 10 polegadas ou mais de diâmetro. O espaçamento mais próximo indica envelhecimento mais avançado causado pelo encolhimento e endurecimento do asfalto ao longo do tempo. A variação diária de temperatura, o envelhecimento do asfalto na mistura e a pobre compactação durante a construção estão entre as principais causas das trincas em bloco (Alaamri *et al.*, 2017; Bernucci *et al.*, 2008).

2.1.8.6. Trincas de jacaré

As trincas de jacaré são rachaduras interligadas formando pequenos pedaços que variam em tamanho de cerca de 1 a 6 polegadas. Elas surgem por falha do revestimento devido à carga de tráfego (fadiga) e muitas vezes, também, devido ao suporte inadequado da base ou do subleito. Factores que ocasionam esses defeitos são: acção climática – gradientes térmicos, envelhecimento do ligante, perda de flexibilidade e compactação deficiente do revestimento (Bernucci *et al.*, 2008).



Trinca transversal



Trinca longitudinal



Trinca de bordo



Trinca por reflexão



Trincas em blocos



Trincas de jacaré

Figura 4. Diferentes tipos de trincas no pavimento asfáltico. Fonte: (Bernucci *et al.*, 2008)

2.1.8.7. Afundamento de trilha de roda

Trilhas de rodas ou rodeiras são causadas por consolidação ou movimento lateral dos materiais quando sujeitos às cargas produzidas pelo tráfego (DNIT, 2005). As camadas e as fundações quando não possuem capacidade suficiente de suporte, formam rodeiras de grande raio. As de pequeno raio são formadas devido à baixa resistência à deformação plástica de misturas betuminosas (Bernucci *et al.*, 2008).

2.1.8.8. Ondulação ou corrugação

É um defeito que tem como peculiaridade pequenos desvios com formato de minúsculas ondas de amplitude irregular, geralmente na posição longitudinal ao pavimento e, em algumas vezes, é acompanhado por escorregamentos do revestimento. Os principais motivos que causam esse defeito são a instabilidade da mistura betuminosa, instabilidade da base, excesso de humidade nas camadas inferiores, contaminação e retenção de água na mistura asfáltica (Bernucci *et al.*, 2008).

2.1.8.9. Escorregamento

A baixa resistência da massa asfáltica ou a falta de aderência entre a camada de revestimento e a camada subjacente são os motivos para a formação das trincas em forma de meia-lua, provocadas pelo deslocamento do revestimento em relação à base (Bernucci *et al.*, 2008)

2.1.8.10. Exsudação

A exsudação do asfalto ocorre em sua superfície por conta da dilatação do asfalto no calor, o qual encontra dificuldade em ocupar espaço devido ao baixo volume de vazios ou ao excesso de ligante, havendo menor viscosidade do asfalto e conseqüente envolvimento dos agregados grossos e redução da macro textura (Bernucci *et al.*, 2008). É caracterizada pelo surgimento de ligante em abundância na superfície, como manchas escurecidas, decorrente em geral do excesso do mesmo na massa asfáltica (Singh e Kumar, 2021).

2.1.8.11. Desgaste

Também designado por desagregação decorre do desprendimento de agregados da superfície ou ainda da perda de mástique junto aos agregados. O desgaste está associado ao tráfego e ao intemperismo e é resultante da deficiência na ligação entre os componentes das misturas betuminosas ou à sua má formulação, da utilização de materiais não apropriados e de erros na construção, como má compactação e problemas na execução da base (Bernucci *et al.*, 2008).

2.1.8.12. Bombeamento

Normalmente localiza-se próximo às trincas ou juntas de construção, tendo como principal característica a erupção de água e finos nas trincas quando a rodovia está exposta a ação de cargas. Sendo provocado pela ocorrência de vazios abaixo do revestimento e por cargas geradas pelos veículos, tal defeito fica perceptível com a ocorrência de manchas no revestimento ou acumulação de material fino junto às trincas (Bernucci *et al.*, 2008; DNIT, 2005).

2.1.8.13. Desnível entre a pista e o acostamento

É um defeito fácil de ser verificado, porque apresenta um desnível entre a pista e acostamento, que aumenta na medida em que se alteram as condições do acostamento. As principais causas são o recalque do acostamento, perda de finos do acostamento, perda de material superficial gerado por intempéries em acostamentos não pavimentados, erros na execução e, também, problemas na execução de revestimentos (Alaamri *et al.*, 2017; DNIT, 2005).

2.1.8.14. Remendo

Superfície original reparada com novo material de remendo de asfalto. Isso indica um defeito no pavimento ou uma escavação de utilidade que foi reparada. Manchas com rachaduras, assentamentos ou distorções indicam que as causas subjacentes ainda permanecem. Reciclagem ou reconstrução são necessárias quando o remendo extenso mostra sofrimento (Bernucci *et al.*, 2008; Singh e Kumar, 2021; Ziliute *et al.*, 2008).

2.1.8.15. Buracos

São furos e perda de material do pavimento causados por carga de tráfego, fadiga e resistência inadequada. As principais causas do surgimento de buracos são a existência de fissuras de vários tipos e em nível avançado, problemas localizados com a mistura asfáltica ou drenagem (Adlinge e Gupta, 2009; Bernucci *et al.*, 2008; Singh e Kumar, 2021).



Figura 5. Defeitos do pavimento asfáltico. Fontes: (Autora; Bernucci *et al.*, 2008; Singh e Kumar, 2021; Walker, 2013).

A taxa na qual o pavimento se deteriora depende das condições ambientais, condições de carga de tráfego, qualidade de construção original e procedimentos de manutenção provisória. Materiais de baixa qualidade ou procedimentos de construção não adequados podem reduzir significativamente a vida útil de um pavimento. Como resultado, dois pavimentos construídos ao mesmo tempo podem ter um tempo de vida significativamente diferente, ou certas partes de um pavimento podem se deteriorar mais rapidamente do que outras. Por outro lado, a manutenção oportuna e eficaz pode prolongar a vida útil de um pavimento (Ziliute *et al.*, 2008).

A busca pelo asfalto de alta qualidade e a limitação do processo de refino desenvolvem pesquisas de ligantes asfálticos reforçados com polímeros ou modificados (Zhu *et al.*, 2014).

O conceito de aproveitamento de resíduos plásticos na construção de pavimentos rodoviários flexíveis vem sendo feito desde o ano 2000 na Índia. Na construção de pavimentos flexíveis, o asfalto desempenha o papel de unir o agregado por revestimento sobre o agregado. Também ajuda a melhorar a resistência e a vida útil do pavimento rodoviário. Mas a sua resistência à água é ainda fraca. Um método comum para melhorar a qualidade do asfalto é modificando as suas propriedades reológicas misturando-se com polímeros sintéticos como borracha e plásticos (Gawande *et al.*, 2012). A modificação com o polímero é definida como a incorporação de polímeros no asfalto por mistura ou reacção química. Existem diferentes polímeros modificadores usados para obter o

melhor desempenho do asfalto original ligante, que incluem elastómeros, plastómeros e resinas (Błażejowski *et al.*, 2014; Brûlé, 1996; Gawande *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2007).

2.2. Polímeros

A palavra polímero é derivada do grego *poli* e *meros*, que significam muitas e partes, respectivamente. Algumas terminologias preferem usar a palavra macromolécula, ou molécula grande, em vez de polímero (Carraher Jr, 2003; Chanda, 2006).

O polímero é definido como qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha uma alta massa molecular e com variedades estruturais repetitivas, sendo que normalmente esta unidade que se repete é de baixa massa molecular (Kumar e Gupta, 2003). Existe no mercado uma grande quantidade e tipos de polímeros, derivados de diferentes compostos químicos. Cada polímero é mais indicado para uma ou mais aplicações dependendo de suas propriedades físicas, mecânicas, eléctricas e ópticas.

Os polímeros são obtidos através da reação química de pequenas moléculas chamadas monómeros. Para formar polímeros, os monómeros têm grupos funcionais reactivos ou ligações múltiplas que fornecem as ligações necessárias entre unidades repetidas. Os materiais poliméricos geralmente têm alta resistência, possuem uma temperatura de transição vítrea, exibem elasticidade de borracha e têm alta viscosidade como fundidos e soluções (Carraher Jr, 2003; Kumar e Gupta, 2003).

Os tipos de polímeros mais consumidos actualmente são os polietilenos, polipropilenos, poliestirenos, poliésteres e poliuretanos, que devido à sua grande produção e utilização são chamados de polímeros *commodities*. Outras classes de polímeros, como os poliacrilatos, policarbonatos e fluorpolímeros tem tido uso crescente. Vários outros polímeros são fabricados em menor escala por terem uma aplicação muito específica ou devido ao seu custo ainda ser alto, e por isso chamados plásticos de engenharia (Guerra e Lima, 2013).

2.2.1. Classificação dos polímeros

De acordo com Rudin, 1982 citado por Chanda (2006) e Glover (2007) os polímeros podem ser classificados de várias maneiras, pela fonte, método de síntese, forma estrutural, comportamento de processamento térmico e seu uso final. Assim, os polímeros são classificados como naturais e sintéticos de acordo com a fonte, como de condensação e adição (ou etapa e cadeia) de acordo com o método de síntese ou mecanismo de polimerização, e como linear, ramificado e em rede de

acordo com a forma estrutural das moléculas do polímero. De acordo com o comportamento durante o processamento térmico, os polímeros são classificados como termoplásticos e termofixos, enquanto de acordo com o uso final é conveniente classificar os polímeros como plásticos, fibras e elastómeros.

2.2.1.1. Termoplásticos

Um termoplástico é um polímero que amolece e endurece reversivelmente sob efeito da temperatura. Tanto os polímeros lineares e ramificados podem ser termoplásticos. Assim, eles podem ser amolecidos e levados a fluir pela aplicação de calor.

Os processos de fabricação como moldagem por injeção, moldagem por extrusão e sopro aproveitam este recurso para moldar resinas termoplásticas. A rigidez das resinas termoplásticas a baixas temperaturas é atribuída à existência de forças secundárias entre as cadeias poliméricas. Essas ligações intermoleculares são destruídas a temperaturas mais altas, causando fluidez da resina. Alguns dos termoplásticos mais importantes, em volume, são polietileno de baixa densidade (LDPE) e polietileno de alta densidade (HDPE)), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e poliestireno (PS) (Chanda, 2006; Guerra e Lima, 2013).

O etileno pode ser polimerizado por vários processos para produzir diferentes variedades de polietileno (PE). Os mais importantes comercialmente são o LDPE, HDPE, e o LLDPE (Behnood e Gharehveran, 2019; Ebewele, 2000). O PE é usado na fabricação de muitos produtos na vida moderna, nomeadamente: utensílios domésticos, mobília, sacolas de supermercado, brinquedos infantis e frascos para cosméticos entre outros (Ghuzlan, 1997). A estrutura do PE é muito simples; consiste em um átomo de carbono ligado a dois átomos de hidrogénio (Figura 6). O PE é dividido em duas categorias principais: LDPE e o HDPE. O LDPE é constituído por átomos de carbono ligados a uma longa cadeia de polietileno (densidade entre 0,91 g/cm³ e 0,94 g/cm³) enquanto o HDPE (densidade superior a 0,94 g/cm³). O HDPE é mais forte que o LDPE, mas ao mesmo tempo é mais caro e mais difícil de fabricar do que o LDPE. O LDPE é obtido por polimerização em pressões e temperaturas muito altas, por outro lado, o HDPE é obtido por polimerização a temperaturas e pressões relativamente baixas (Canevarolo Junior, 2006; Ghuzlan, 1997).

A Figura 7 apresenta a estrutura do HDPE. Os plastómeros como PE aumentam a consistência, o módulo resiliente e a resistência a rachadura de materiais asfálticos (Punith *et al.*, 2011; Punith e Veeraragavan, 2011). Baseado na massa molecular e no processo de polimerização, o PE pode ser classificado em vários tipos e cada um com diferentes desempenhos reológicos (Punith e Veeraragavan, 2011).

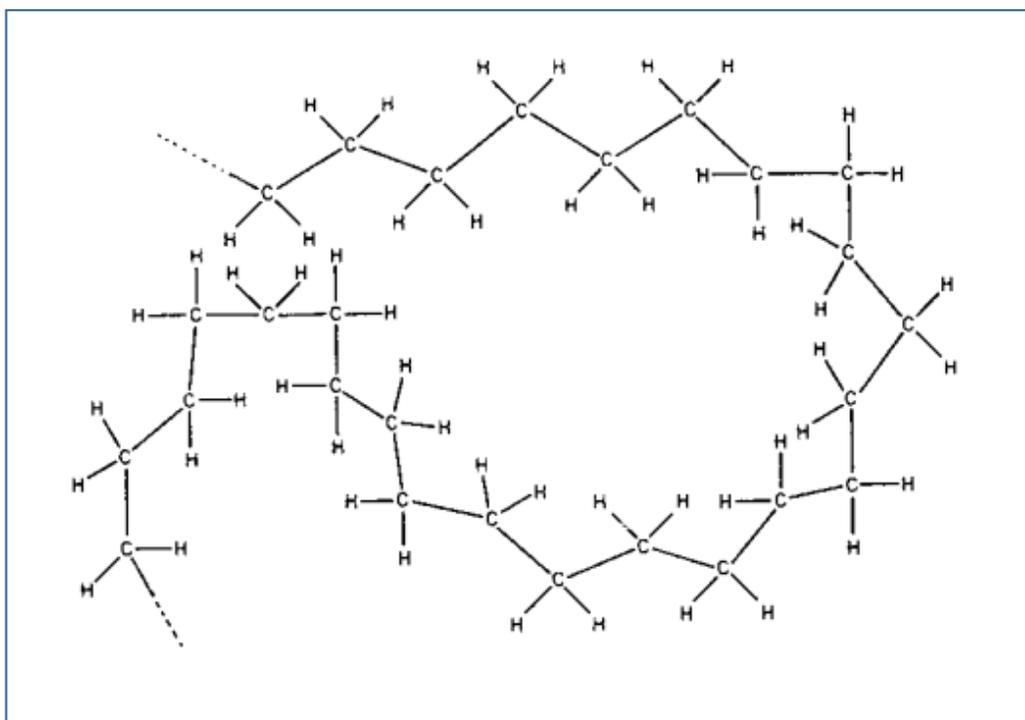


Figura 7. Estrutura do HDPE. Fonte: (Carraher Jr, 2003)

2.2.1.2. Termofixos

Os termofixos são polímeros formados por mistura e reação química de precursores fluídos em um molde. Uma vez que os precursores reagem é criada uma rede reticulada que não pode mais fluir sob aquecimento. Portanto, a reação e a moldagem na forma final geralmente ocorrem ao mesmo tempo. Exemplos de termofixos comuns são alguns poliésteres, resinas de fenol-formaldeído, resinas epóxi e poliuretanos (Guerra e Lima, 2013).

2.2.1.3. Elastómeros e Fibras

Elastómeros ou borrachas são materiais flexíveis usados, principalmente, em pneus, mangueiras e vedações. Também são aplicados como adesivos ou modificadores de impacto de termoplásticos. Eles apresentam alta resistência ao impacto, mesmo em baixas temperaturas nas quais os materiais aumentam sua rigidez (Chanda, 2006).

Os elastómeros aumentam a propriedade elástica do asfalto e resultam no aumento do módulo complexo a altas temperaturas, na diminuição módulo complexo a baixas temperaturas, e na melhoria da ductilidade (Wang *et al.*, 2018). Estes aditivos, como o estireno-butadieno copolímero tribloco de estireno (SBS) reduzem a fadiga e rachaduras térmicas de pavimentação asfáltica (Radziszewski, 2007), mas são muito caros e facilmente sujeitos à degradação quando expostos ao estresse mecânico e ar (Polacco *et al.*, 2005).

As fibras são polímeros com módulos muito altos e muito alta resistência à deformação; portanto, elas alongam muito pouco. Alguns exemplos de polímeros usados como fibras são nylon (poliamida), poliésteres e poliácrlonitrila (fibra acrílica) (Ebewele, 2000).

2.2.2. Polímeros compatíveis com o asfalto

De acordo com Brûlé (1996), a experiência indica que poucos polímeros termoplásticos são realmente compatíveis com asfaltos. Polímeros industriais usados para modificação de asfalto são essencialmente de dois tipos:

- Plastómeros, geralmente copolímeros de etileno vinilacetato (EVA) cujos graus diferem de acordo com seu teor de vinilacetato e sua massa molecular; e
- Elastómeros termoplásticos, sendo os mais conhecidos copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS). Diferenciam-se pelo teor de estireno, massa molecular e configuração (linear ou estrela). Os copolímeros de estireno-isopreno-estireno também são usados.

Glover (2007) sistematizou os polímeros comumente usados em misturas de asfalto e indicou algumas de suas vantagens e desvantagens (Tabela 5).

Tabela 5. Polímeros comumente usados em misturas

Polímero	Vantagem	Desvantagem
SBS (radial e linear)	Boa resistência à fadiga; Alta taxa de fluência	Susceptibilidade à oxidação
PE	Alta extensão térmica	Baixa rigidez
SBR	Bom envelhecimento e resistência	Baixa resistência ao ozono; Susceptibilidade à oxidação
PB	Excelente resistência ao desgaste; Resiliência ao impacto	Baixa força
EVA	Estabilidade de armazenamento; Reduz o escoamento de aglutinante	Pode ser susceptível a reticulação; Baixa fluência e resistência
PP	Boa resistência química; Boa resistência à fadiga	Degradação oxidativa; Alto encolhimento do molde; Expansão térmica

2.2.3. Processos para a incorporação do polímero ao asfalto

São dois os principais processos empregues para a incorporação do polímero ao asfalto: a via seca e a via húmida.

2.2.3.1. Incorporação do polímero ao asfalto por via seca

Para a pavimentação flexível o agregado é aquecido até uma temperatura de 170 °C e misturado ao asfalto previamente aquecido a uma temperatura de 160 °C e a mistura é aplicada na pavimentação. O agregado é escolhido tendo como base a sua força, porosidade e capacidade de absorver a humidade. O asfalto é escolhido de acordo com suas propriedades ligantes, valor de penetração e sua propriedade viscoelástica. O agregado quando revestido com o plástico melhora suas qualidades com respeito a evitar a absorção da humidade e dureza. O revestimento com plástico reduz a porosidade e ajuda a melhorar a qualidade do agregado e o seu desempenho no pavimento flexível (Celauro *et al.*, 2012; Gawande *et al.*, 2012).

O processo via seca apresenta algumas vantagens pois o polímero reveste o agregado, melhorando as propriedades da superfície do agregado. Este processo de revestimento é simples e requer a mesma temperatura aplicada durante a pavimentação. É possível aplicar mais de 15 wt% de polímero, onde se duplica a capacidade do agregado ligar-se ao ligante pois o agregado revestido apresenta maior força. Esta processo pode ser aplicado em qualquer tipo de clima, e não há emissão

de gases tóxicos uma vez que a temperatura máxima empregue no processo é inferior a 180°C (Celauro *et al.*, 2012; Gawande *et al.*, 2012).

2.2.3.2. Incorporação do polímero ao asfalto por via húmida

O polímero residual é granulado e triturado até à formação do pó, e 1 a 8 wt% são misturados ao asfalto. O polímero aumenta a temperatura de fusão do asfalto e faz com que o pavimento mantenha sua flexibilidade durante o inverno resultando em um tempo de vida longo. O uso de polímero em pó incrementa a força do asfalto como ligante e aumenta o seu tempo de vida. Neste processo o polímero residual é fundido e misturado ao asfalto em uma proporção particular. O processo pode ser levado a cabo pela reciclagem de vários tipos, tamanhos e formas de polímero (plástico e borracha). Por outro lado consome muita energia, necessita de força mecânica e a percentagem máxima de polímero a ser adicionada normalmente não excede 8 wt% (Celauro *et al.*, 2012). Os polímeros comumente usados são geralmente adicionados em concentrações de 4 a 6 wt% de ligante asfáltico e melhoram as propriedades do asfalto base em uma ampla faixa de temperaturas e condições de vida útil. Concentrações mais altas de polímeros são consideradas economicamente menos viáveis e também podem causar outros problemas, como separação de fases. Os polímeros podem aumentar a viscosidade dos ligantes asfálticos em altas temperaturas ou a ductilidade deles em baixas temperaturas. Um bom modificador altera as propriedades de falha de tal forma que o ligante produz mais tensões e deformações antes da falha. A selecção de um polímero apropriado para fins de modificação pode ser eficaz do ponto de vista de engenharia e económico para alcançar as propriedades desejadas (Behnood e Gharehveran, 2019). O uso de polímeros residuais para modificação de asfalto tem vantagens ambientais e económicas notáveis (Radeef *et al.*, 2022).

2.2.4. Compatibilidade entre polímero e asfalto

Existe uma relação complexa entre a composição química dos asfaltos rodoviários, sua estrutura coloidal e suas propriedades físicas e reológicas. Qualquer coisa que modifique a composição química de um asfalto infalivelmente modifica sua estrutura e, conseqüentemente, suas propriedades (Brûlé, 1996).

Nem todos os polímeros são passíveis de serem adicionados ao asfalto e nem todo asfalto quando modificado por polímeros apresenta estabilidade ao armazenamento. Os asfaltos que melhor se compatibilizam com polímeros são aqueles que apresentam uma certa aromaticidade. A

quantidade de polímero que deve ser adicionada ao ligante é variável e depende das propriedades finais desejadas. É necessário também verificar a adequada dispersão do polímero no asfalto, de forma que a matriz polimérica fique fixada na estrutura do asfalto (Bernucci *et al.*, 2010).

O PE reciclado é usado como modificador para o asfalto, a adição de teores de PE ao asfalto reduz os valores de penetração e ductilidade, enquanto aumentos nos valores de ponto de amolecimento e gravidade específica foram observados com a adição de modificador de PE (Punith & Veeraragavan, 2007). Ghuzlan *et al.* (2015) misturaram asfalto e PE na forma de saco plástico e não obtiveram uma mistura homogênea, o teste realizado com o PE em grânulos resultou em uma mistura final não completamente homogênea, a mistura homogênea só foi obtida pela mistura do asfalto com PE em pó nos teores de 3, 4, 5, 6 e 7 wt% de PE por volume de asfalto, resultado similar foi obtido por Kashem (2012) na mistura de asfalto e PE em pó. Por outro lado um estudo realizado por Appiah *et al.* (2017) compósitos com os polímeros HDPE e PP nas percentagens de 0.5 – 3 wt%, resultaram em uma mistura homogênea. Foi possível obter uma mistura homogênea de asfalto e LDPE em cortado até tamanho de 3 X 3 mm, foi necessária uma velocidade de rotação de 3000rpm em 20 minutos para tornar a mistura homogênea (Panda & Mazumdar, 2002).

De acordo com Brûlé (1996) se precauções não forem tomadas durante o processo de mistura do asfalto e polímero os seguintes fenômenos podem ocorrer:

- **A mistura é heterogênea:** este é o resultado mais provável (ou seja, onde o polímero e o asfalto se mostram incompatíveis). Neste caso, os constituintes da mistura se separam e a mistura não tem nenhuma das características de um ligante asfáltico.
- **A mistura é totalmente homogênea:** inclusive ao nível molecular. Este é o caso pouco frequente de perfeita compatibilidade. Neste caso, os óleos no asfalto solvatam o polímero perfeitamente e destroem quaisquer interações macromoleculares. O ligante é extremamente estável, mas a modificação das qualidades de serviço em relação às do asfalto inicial é muito pequena. Apenas sua viscosidade aumenta. Este não é, portanto, o resultado desejado.
- **A mistura é micro-heterogênea:** e é composta por duas fases distintas e finamente interligadas. Esta é a compatibilidade pretendida e confere ao asfalto propriedades genuinamente modificadas. Em tal sistema, o polímero compatível “incha” absorvendo algumas das frações oleosas do asfalto para formar uma fase de polímero distinta da fase

de asfalto residual compreendendo as fracções pesadas do aglutinante (o restante dos óleos, mais as resinas e asfaltenos).

Uma modificação ideal o asfalto este deve ter coesão aprimorada e susceptibilidade a temperaturas muito baixas em toda a faixa de temperaturas a que estará sujeito em serviço, mas baixa viscosidade nas temperaturas usuais em que é colocado. Sua suscetibilidade ao tempo de carregamento deve ser baixa, enquanto sua resistência à deformação permanente, resistência à ruptura e características de fadiga devem ser altas. Ao mesmo tempo, deve ter pelo menos as mesmas qualidades de adesão (ativa e passiva) que os ligantes tradicionais. Por último, as suas características de envelhecimento devem ser boas, tanto para postura como em serviço (Brûlé, 1996).

2.3. Óleos vegetais

Os óleos vegetais são um grupo de gorduras derivadas de algumas sementes, nozes, grãos de cereais e frutas. Eles contêm 95-98% de triacilgliceróis (ou triglicerídeos) (Hammond, 2003). A fracção restante consiste em fosfolipídios, monoacilgliceróis e diacilgliceróis e insaponificáveis, incluindo esteróis e tocoferóis. Os óleos consistem de ácidos gordos de cadeia longa, de C₁₄ a C₂₄ de comprimento. Uma proporção desses ácidos gordos no óleo tem uma contribuição para o seu valor nutricional (Mailer, 2016).

2.3.1. Óleo vegetal de soja

O óleo vegetal de soja teve origem na China, mas hoje é cultivado internacionalmente e é um dos óleos vegetais mais importantes em termos de quantidade produzida e utilização na produção de resinas industriais. É um óleo comestível semi-secante. A sua principal vantagem é a sua propriedade não amarelada devido ao seu baixo teor de ácido linolênico (a Figura 8 apresenta a estrutura típica encontrada no óleo de soja). Os óleos de soja na forma adequada podem ser misturados com linhaça, óleo de rícino desidratado e óleo de tungue na fabricação de tintas para casa, vernizes, acabamentos de cozimento para automóveis e diversos acabamentos sintéticos de secagem. Pode ser usado como um substituto limitado do óleo de linhaça e é usado na fabricação de lubrificantes industriais, bem como em uma variedade de resinas industriais. As propriedades do óleo vegetal de soja estão apresentadas na Tabela 6 (Dijkstra, 2015; Gustone, 2002; Karak, 2012).

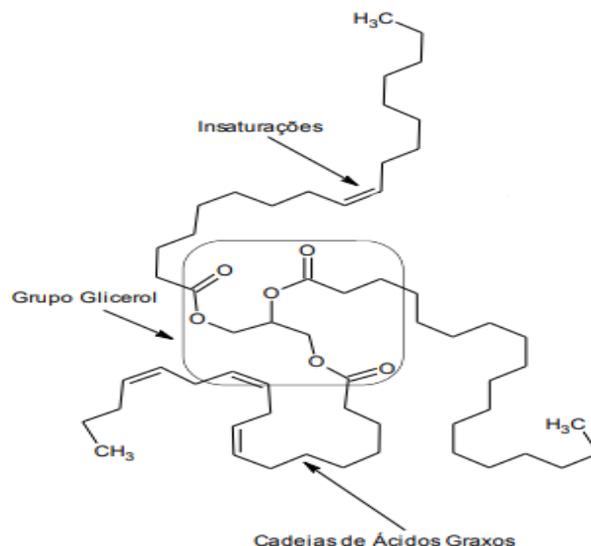


Figura 8. Exemplo da estrutura molecular típica encontrada para os triglicerídeos do óleo vegetal extraído da soja. Fonte: (Pontel, 2016)

Tabela 6. Composição e propriedades físicas do óleo de soja.

Nome comum	Óleo de soja
Nome botânico	<i>Glycine max</i>
Teor de óleo, wt%	16-22
Composição dos ácidos gordos, wt%	
Palmítico	10.5
Esteárico	3.2
Oleico	22.3
Linoléico	54.5
Linolênico	8.3
Outros ácidos	Eicosac (0.9); araquídico (0.2)
Valor de iodo	130
Valor de saponificação	189-195

Fonte: (Karak, 2012)

Os principais componentes do óleo vegetal são ácidos gordos de cadeia linear e glicerídeos (Figura 9). Os ésteres de ácidos gordos superiores de cadeia linear e glicerol não são voláteis a altas temperaturas. Portanto, eles podem ser usados para recuperar a composição microquímica do asfalto e uma mudança na estabilidade coloidal do asfalto (Chen, *et al.*, 2021).

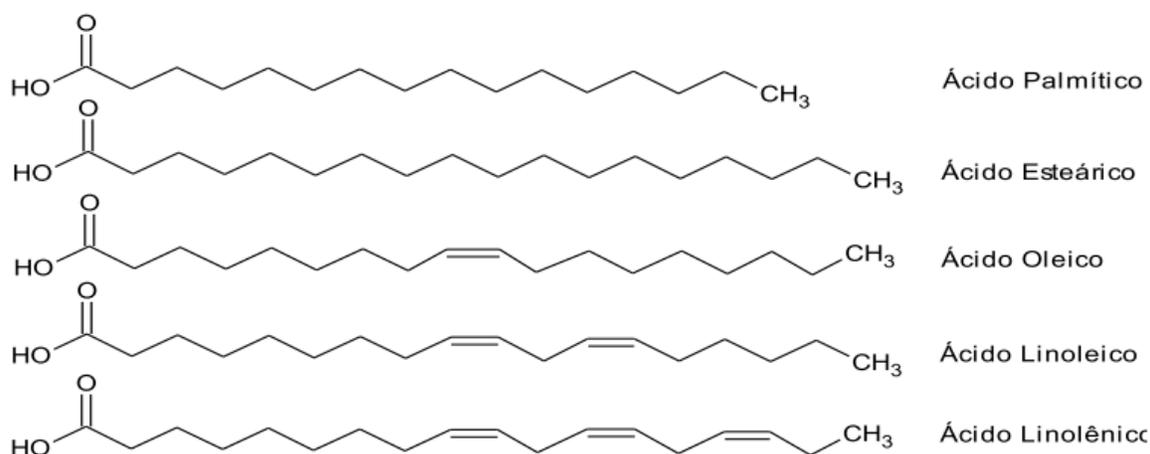


Figura 9. Estruturas moleculares dos principais ácidos gordos encontrados no óleo de soja.

Fonte: (Pontel, 2016)

O óleo vegetal de soja forma uma emulsão em contacto com a água, é ligeiramente solúvel em água e álcool, solúvel em hexano e outros solventes à base de hidrocarbonetos não polares (Baker *et al.*, 2018). Algumas características e propriedades físicas do óleo de soja estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Propriedades físicas do óleo vegetal de soja.

Propriedade	Característica/Valor
Estado físico 25°C 1 atm	Líquido
Cor	Amarelo pálido a amarelo acastanhado
Odor	Leve odor característico
Densidade	0.919 – 0.922
Temperatura de fusão	-10 a -16°C
Temperatura de ebulição	Bruto: 185°C Refinado e Branqueado: 228-234°C
pH	7.5
Viscosidade	60 η, mPa-1 s
Miscibilidade	Miscível com álcool absoluto, éter, éter de petróleo, clorofórmio, dissulfeto de carbono
Inflamabilidade no armazenamento	Ponto de inflamação: 328°C; Ponto de incêndio: 363°C

Fonte: (Baker *et al.*, 2018)

Disponibilidade de óleos vegetais em Moçambique

De acordo com um estudo realizado por [Hamela e Pimpão \(2021\)](#), Moçambique produz um variado conjunto de sementes oleaginosas que fornece às fábricas locais de óleos alimentares. Este conjunto inclui o algodão, coco, soja, girassol, amendoim e sésamo/gergelim. O processamento é efectuado por pequenas e médias empresas que produzem óleos alimentares para o mercado doméstico. A copra, o girassol, a soja e a semente de algodão são fornecidas à indústria de óleos por produtores nacionais, grande parte do mercado nacional de óleo alimentar é abastecido por grandes processadores que refinam o óleo alimentar com base em óleo cru importado essencialmente da Argentina, Indonésia, África do Sul, Malásia e outros países asiáticos e europeus. Os óleos de palma e o de soja constituem mais de 70% do óleo consumido em Moçambique.

O óleo vegetal é um resíduo comum nas indústrias de alimentos e hotelaria. Foi proposto como um modificador do asfalto para melhorar seu desempenho no pavimento rodoviário ([Sonibare et al., 2021](#)).

2.3.2. Óleo residual de Cozinha aplicado na pavimentação

Óleo residual de cozinha (ORC) resultante de frituras repetidas é observado como uma potencial alternativa para modificar asfaltos aplicados na pavimentação ([Luo et al., 2017](#)).

Algumas pesquisas foram desenvolvidas com emprego de óleos vegetais (com a finalidade principal de reaproveitamento do óleo de cozinha residual) para produção de misturas asfálticas semimornas e mornas, bem como o rejuvenescimento do asfalto envelhecido ([Chen et al., 2018b](#)).

O óleo de cozinha residual, comparado com outros componentes de baixa viscosidade, tem o ponto de fulgor acima de 220°C, isto faz com que o cozimento do óleo de cozinha residual apresente elevada segurança para aplicação nas misturas asfálticas. Além disso, o óleo de cozinha residual passa pelo processo de cozedura em altas temperaturas, e conseqüentemente, quando aquecido novamente, não apresenta componentes voláteis como gases tóxicos ([Chen et al., 2014](#)). Um estudo realizado por [Li et al. \(2019\)](#) mostra a aplicação do óleo residual de cozinha como aditivo para o agregado reciclado por forma a reduzir a quantidade de asfalto aplicado a pavimentação, resultados mostram que o pré-tratamento do agregado com o óleo residual reduz e em cerca de 5.4 – 4.5 wt% de consumo de asfalto, diminui a temperatura de processamento do asfalto bem,

incrementa a resistência a fadiga. Por outro lado aumenta a susceptibilidade a degradação por acção da água, reduz a resistência a deformação permanente. Outro estudo conduzido por [Sun et al. \(2017\)](#), mostra a possibilidade do uso do óleo como substituinte parcial do asfalto na pavimentação. [Asli et al. \(2012\)](#), descobriu em seus estudos que óleo residual de cozinha reduz de forma significativa o ponto de amolecimento e a viscosidade do asfalto. Por outro lado [Sun et al. \(2017\)](#) conduziu uma investigação e observou que o óleo residual de cozinha derivado do bio óleo pode reduzir a resistência à deformação e melhorar a resistência a fadiga.

[Haghshenas et al., \(2021\)](#) avaliaram os efeitos de cinco agentes de reciclagem quimicamente diferentes: extratos aromáticos, óleo parafínico, óleo nafténico; triglicerídeos/ácidos gordos e talol na resistência a rachadura associada ao envelhecimento e na resistência ao dano por humidade de ligantes asfálticos modificados, os resultados mostraram que, quando comparados com extratos aromáticos, os triglicerídeos/ácidos gordos e agentes de reciclagem do talol que contêm teor de oxigénio, carbonil e grupos funcionais hidroxila não podem manter a resistência a rachaduras a baixa temperatura a longo prazo após o envelhecimento, resultado semelhante foi relatado por [Zaumanis et al., 2014](#). De acordo com [Zaumanis et al. \(2014\)](#) o uso de óleo vegetal residual, graxa vegetal residual, óleo orgânico, óleo de motor usado e extratos aromáticos como agentes de reciclagem aumentam a suscetibilidade de rachaduras de misturas de pavimento asfáltico recuperadas e diminuem a resistência a rachaduras em baixa temperatura.

[Chen et al. \(2018\)](#) investigaram os efeitos do óleo de soja epoxidado acrilado produzido em laboratório (AESO) e do AESO comercial e avaliaram as propriedades do ligante asfáltico puro a temperaturas baixa, intermediária e alta. Tanto o AESO produzido em laboratório quanto o comercial reduziram ligeiramente a alta temperatura crítica dos ligantes puros e envelhecidos em RTFO. Esta observação indica que o AESO afeta negativamente o desempenho de alta temperatura do ligante asfáltico. Resultados obtidos da simulação de dinâmica molecular em modelo de asfalto modificado com óleo vegetal realizado por [Sonibare et al. \(2021\)](#), sugerem que a implementação do óleo vegetal pode melhorar o desempenho do asfalto, facilitando a mistura dos componentes na mistura asfáltica e o relaxamento da reorientação do asfalto em baixas temperaturas, mas não em altas temperaturas, reduzindo assim a viscosidade da mistura em baixas temperaturas, tendo efeito insignificante em altas temperaturas.

Embora um número considerável de estudos tenha mostrado os efeitos negativos dos bio óleos no desempenho em alta temperatura de ligantes e misturas asfálticas (Yang *et al.*, 2014). Alguns estudos relataram que os bio óleos podem melhorar o desempenho em alta temperatura (Lei *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018). A adição de polímeros como SBS ou borracha triturada ao bio asfalto seria recomendada para melhorar as propriedades de alta temperatura (Luo *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018). Devido aos efeitos dos bio óleos nas propriedades de alta temperatura e viscosidade dos ligantes asfálticos, eles são bons modificadores para o rejuvenescimento de ligantes asfálticos (Behnood e Gharehveran, 2019).

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Materiais

O asfalto usado neste estudo enquadra-se no grupo de asfaltos com especificação 50/70 de penetração, fornecido pela Puma Energy, uma das empresas fornecedoras de asfalto em Moçambique. As propriedades do asfalto (Figura 10 a) são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Propriedades do asfalto puro

Propriedades	Método de teste	Resultados	Especificação
Penetração a 25°C, dmm	ASTM D5	54.0	50 – 70
Ponto de amolecimento, °C	ASTM D36	47.0	49 – 56
Ductilidade a 25 °C; 5 cm/min	ASTM D113	>100	Mínimo 100
Densidade, kg/ m ³	D71 e D3289	990 – 1300	1010 – 1060
Ponto de inflamação, °C	ASTM D92	>230	Mínimo 230
Solubilidade, wt%	ASTM D2042	Solúvel na maioria dos solventes orgânicos	Mínimo 99.0

Foi usado o HDPE em pó com densidade de 0.95 g/cm³ e índice de fluidez de 1.7 g/10min a 190°C, ponto de fusão 130 – 135°C e diâmetro médio das partículas de 0.8 mm, fornecido pela Sasol, SA (Figura 10b).

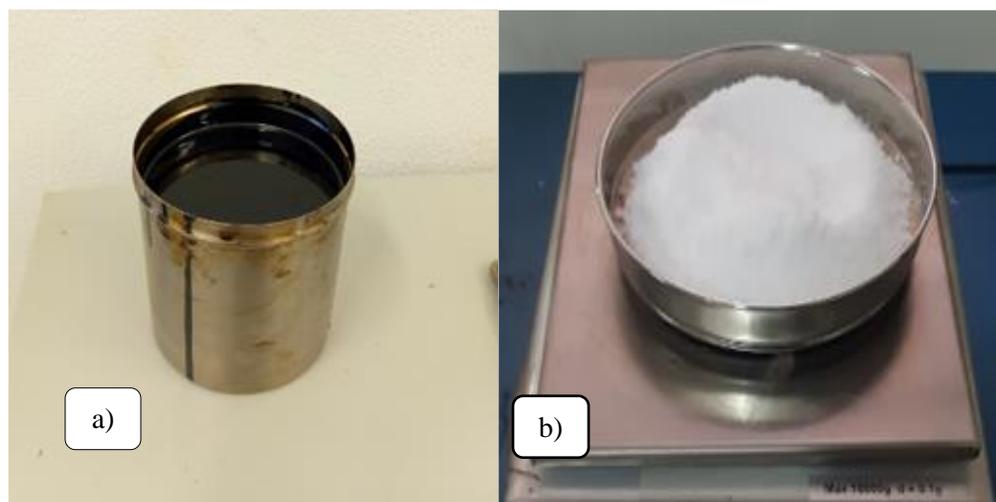


Figura 10. a) Asfalto puro; e b) HDPE em pó puro.

O óleo vegetal de soja (alimentar) da marca fló foi fornecido pela empresa Maeva (Figura 11).



Figura 11. Óleo vegetal de soja

3.2. Métodos

3.2.1. Preparação do asfalto modificado por via húmida

Inicialmente, em um recipiente de aço inoxidável, o asfalto puro foi aquecido e agitado até a fusão e mantido em uma faixa de temperatura de 130 – 135°C, a 5000 rpm em um misturador de alto cisalhamento, IKA® EUROSTAR 20 por 20 min. Em seguida, 5 wt% do polímero HDPE em pó foi gradualmente adicionado e aquecido a 170°C a 5000 rpm por mais 20 min. A concentração de HDPE foi mantida constante em 5 wt% e o teor de óleo vegetal de soja foi variado. O óleo foi adicionado gradualmente nas proporções indicadas na Tabela 9 (0 – 7 wt%).

Tabela 9. Composição das amostras

Amostra	1	2	3	4	5	6
Designação	AP	AH5	AH5O1	AH5O3	AH5O5	AH5O7
HDPE (wt%)	0	5	5	5	5	5
Óleo vegetal de soja (wt%)	0	0	1	3	5	7

Onde, AP – Asfalto puro; AH – Asfalto + HDPE e AHO – asfalto + HDPE + óleo vegetal de soja.

A mistura foi mantida a 160 – 170°C em velocidade de agitação constante (5000 rpm) por mais 15 min, obtendo-se uma mistura homogênea. A amostra controle (asfalto puro) também foi submetida ao mesmo protocolo. Em seguida, as misturas foram colocadas em pequenos recipientes para posterior análise. Um total de 06 amostras com diferentes composições foram obtidas a partir da mistura de asfalto, polímero e óleo vegetal. A Figura 12 ilustra o processo de preparação das misturas.



Figura 12. Preparação do asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja

O diagrama que se segue ilustra as etapas envolvidas na preparação do asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja bem como os testes de caracterização realizados (Figura 13).

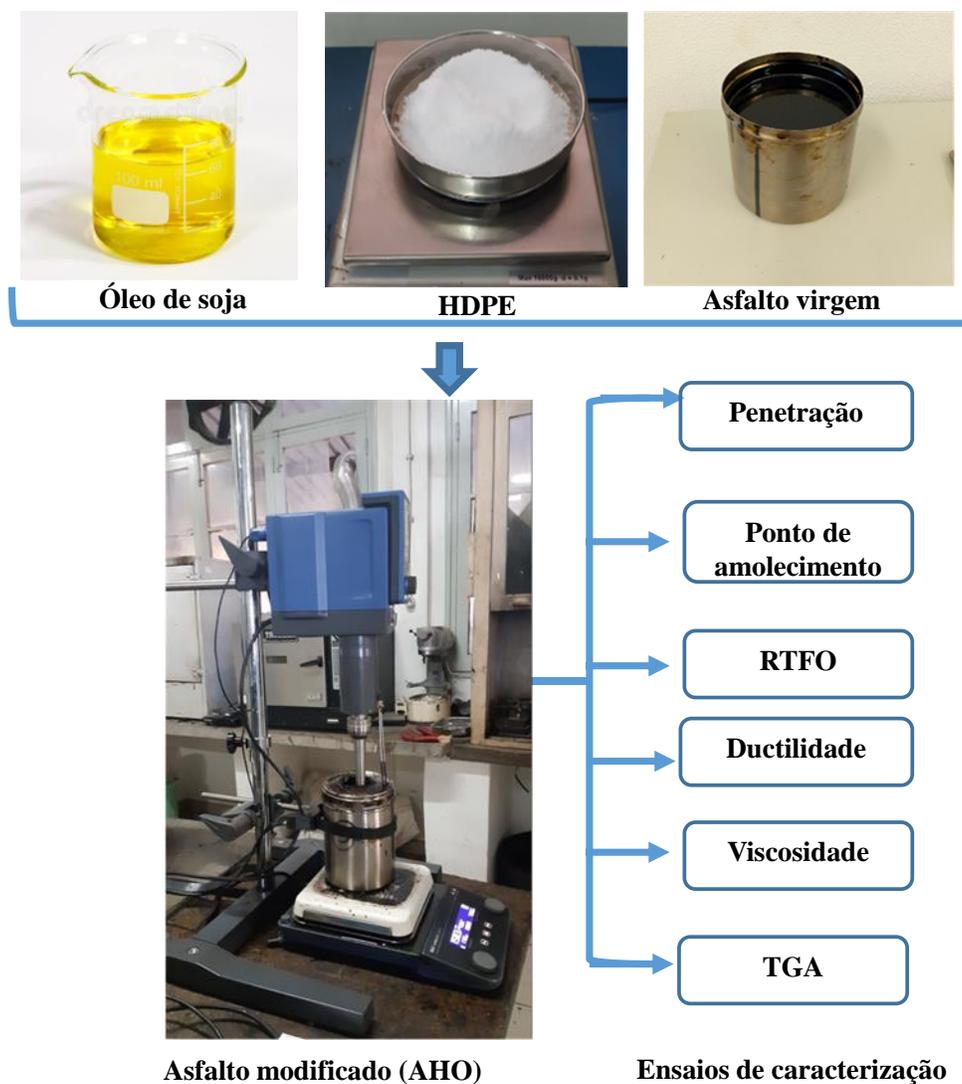


Figura 13. Diagrama ilustrativo do processo de preparação e caracterização do asfalto

3.2.2. Ensaio de caracterização do asfalto e dos compósitos AHO

Foram realizados ensaios para a caracterização físico-química, térmica e reológica das amostras. As amostras foram preparadas e a caracterização (teste de penetração e anel e bola) do asfalto foi feita obedecendo as normas ASTM em uso no Laboratório de engenharia de Moçambique (LEM). Os testes de viscosidade dinâmica a 165 °C, ductilidade a 25 °C e teste de envelhecimento (RTFO) foram realizados no laboratório do *CSIR, Road Material Department*, de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM específica para cada ensaio. As análises

termogravimétricas foram realizadas no departamento de Química da Universidade Eduardo Mondlane.

3.2.2.1. Penetração

O teste de penetração é comumente usado para determinar a consistência do asfalto e a profundidade de penetração. O teste de penetração foi realizado a uma temperatura de 25 °C, peso de carga de 100 g e um tempo de penetração da agulha de 5 s (Figura 14), de acordo com a norma D005 ASTM (2006).



Figura 14. Ensaio de penetração

A profundidade de penetração está correlacionada com o desempenho do asfalto. Tem sido demonstrado que ligantes asfálticos com altos valores de penetração são usados em climas frios, enquanto em climas quentes são usados os de baixos números de penetração. A consistência do asfalto, relacionada à mudança de temperatura, pode ser determinada plotando o logaritmo da penetração (P) contra a temperatura (T).

3.2.2.2. Ponto de amolecimento

O teste de Anel e Bola é um método fácil e eficaz para medir o ponto de amolecimento (SP) do asfalto. Na análise de asfalto, o ligante com alto ponto de amolecimento possui grande resistência à ruptura. Este teste é realizado usando um anel e uma bola como aparatos. O princípio por detrás deste método é: uma bola de aço de dimensões e pesos especificados (Figura 15) é colocada no

centro de uma amostra de asfalto em banho. Este é aquecido a uma taxa controlada de 5° C/min. Quando o asfalto amolece a bola e o asfalto deslocam-se em direcção ao fundo. Este ensaio é usado para estimar a susceptibilidade térmica do asfalto e foi realizado obedecendo a norma [ASTM D036 \(2014\)](#).



Figura 15. Amostras para o ensaio de anel e bola (ponto de amolecimento).

3.2.2.3. Índice de susceptibilidade térmica (PI)

O índice de susceptibilidade térmica, também designado de índice de penetração (PI), é um parâmetro usado para indicar a sensibilidade do asfalto em diferentes temperaturas. O PI pode ser avaliado pelo procedimento proposto em 1936 por Pfeiffer e Van Doormaal, a partir do SP do asfalto e de sua penetração (Pen) a 25°C, como mostra a Equação 1 ([Gigante, 2007](#)).

$$PI = \frac{1952 - 500\log Pen - 20SP}{50\log Pen - SP - 120} \quad (1)$$

3.2.2.4. Testes de envelhecimento a curto prazo

O ensaio RTFOT, que simula o envelhecimento da usinagem, foi realizado à uma temperatura de 163°C e, em seguida, foi feita a determinação da perda ou ganho de peso. O teste seguiu o protocolo descrito na norma [D2872 ASTM \(2019\)](#).

As amostras foram envelhecidas em uma estufa de filme fino rotativo (Figura 16). Após o teste de envelhecimento a curto prazo as amostras foram novamente submetidas aos testes de viscosidade e ductilidade.

A variação de massa das amostras foi determinada por meio da Equação 2:

$$M = \frac{M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}}{M_{\text{inicial}}} * 100 \quad (2)$$

Onde:

M = variação em massa (%)

M_{inicial} = massa do asfalto antes do RTFO (g)

M_{final} = massa do asfalto depois do RTFO (g)

A propriedade anti-envelhecimento do asfalto foi avaliada pelo índice de viscosidade de envelhecimento (VAI) e razão de ductilidade (DAR), de acordo com as Equações 3 e 4. Quanto maior o VAI e o DAR, mais grave é o envelhecimento do asfalto (Zhang, 2020).

O VAI é um parâmetro muito importante para avaliar as propriedades de resistência ao envelhecimento do asfalto. Quanto maior o índice de viscosidade, menor a mudança na viscosidade do asfalto para uma determinada mudança de temperatura e vice-versa, portanto, um fluido com um baixo índice de viscosidade experimentará uma oscilação relativamente grande na viscosidade à medida que a temperatura muda (Luo *et al.*, 2017).

$$\text{DAR} = \frac{D_{\text{depois}}}{D_{\text{antes}}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{VAI} = \frac{V_{\text{depois}} - V_{\text{antes}}}{V_{\text{antes}}} \times 100 \quad (4)$$

Onde, V_{antes} e D_{antes} são viscosidade e ductilidade antes do RTFO, e V_{depois} e D_{depois} de são a viscosidade e ductilidade após RTFO, respectivamente.



Figura 16. Estufa de filme fino rotativo.

3.2.2.5. *Viscosidade*

O teste de viscosidade dinâmica Brookfield aplica a diferença na resistência de um fuso rotativo imerso em asfalto com viscosidade diferente. A resistência aumenta à medida que a viscosidade do asfalto aumenta, enquanto o torque do fuso permanece dentro da faixa pré-definida apropriada (Błażejowski *et al.*, 2014).

O teste de viscosidade foi conduzido de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D4402 para determinar o fluxo do asfalto a altas temperaturas, assim como a medição da trabalhabilidade do asfalto. O viscosímetro rotacional é utilizado para caracterizar a rigidez do asfalto acima de 100 °C. As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos compostos são importantes para selecionar a matéria-prima e designar a estrutura do pavimento. O teste de viscosidade foi realizado a uma temperatura próxima à temperatura de processamento do asfalto (165°C a 100 rpm). Para ambas amostras não envelhecidas e envelhecidas foi usado o viscosímetro Brookfield ilustrado na Figura 17 (D4402 ASTM, 2002).



Figura 17. Viscosímetro Brookfield.

3.2.2.6. Ductilidade

A ductilidade é dada pelo alongamento, em cm, obtido antes da ruptura de uma amostra de asfalto, em banho de água a 25°C, submetida pelos dois extremos à tracção de 5 cm/min (Figura 18). O teste foi realizado de acordo com o padronizado na norma [ASTM D113 \(2015\)](#).

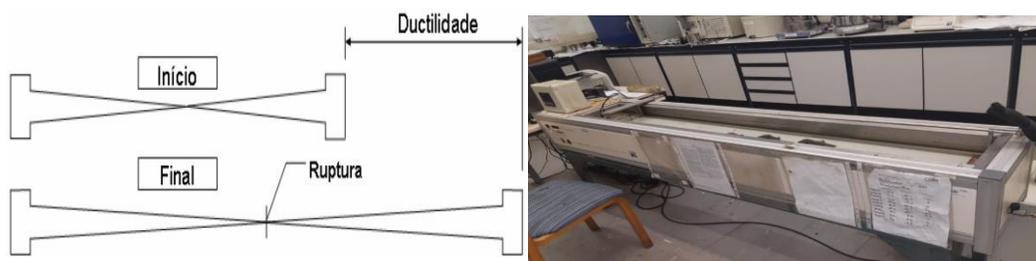


Figura 18. Ensaio de ductilidade

3.2.1.7. Análise termogravimétrica

A estabilidade térmica pode ser considerada efectivamente como um factor importante, pois permite estimar a capacidade do material resistir a mudanças de temperatura, sem no entanto alterar a sua composição inicial. Neste estudo, o comportamento térmico do polímero e dos compósitos foi estudado por termogravimetria (TGA). Foi usado o aparelho TGA Q600 Shimadzu (Figura 19) em uma atmosfera de nitrogénio (N₂). Cerca de 15 ± 0.1 mg de amostra foi aquecida com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, no intervalo de temperatura de 25 a 600 °C. As curvas

TGA e DTG foram analisadas para estudar a estabilidade térmica do polímero, asfalto, óleo e dos compósitos de asfalto pela determinação da temperatura de amolecimento e de decomposição.

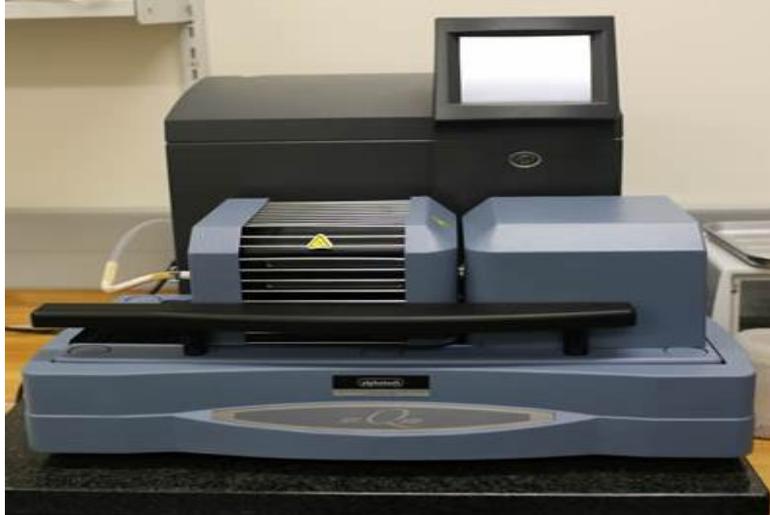


Figura 19. TGA Instrumento Q600 Shimadzu

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Penetração

O valor de penetração do ligante asfáltico representa a sua consistência, reflecte as propriedades reológicas do asfalto e descreve as propriedades de fluxo e deformação dos ligantes asfálticos. O efeito do óleo vegetal de soja no valor de penetração do asfalto modificado com HDPE é mostrado na Figura 20. Os resultados revelam que o HDPE diminui a penetração do ligante asfáltico puro. Com um teor de 5 wt% de HDPE, observou-se que a penetração diminuiu em quase 45% em comparação com o ligante não modificado. Este resultado indica maior rigidez da mistura obtida e conseqüentemente um pavimento mais resistente às cargas do tráfego. Um resultado semelhante também foi relatado por [Appiah et al. \(2017\)](#).

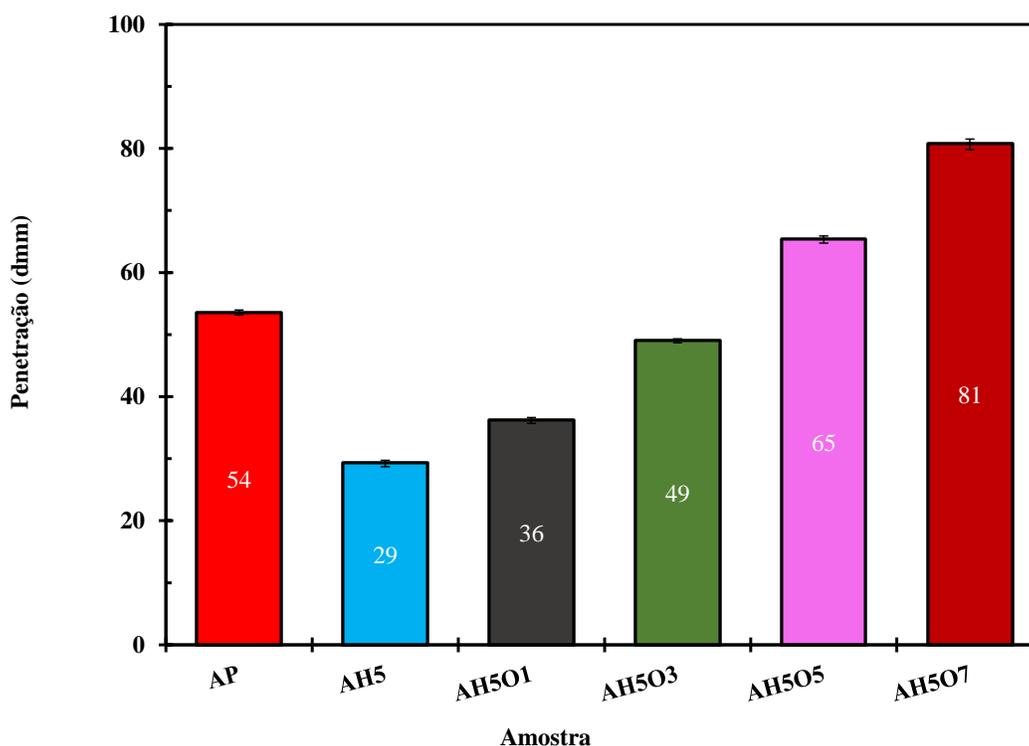


Figura 20. Resultados do teste de penetração determinado pelo método convencional

O valor de penetração é inversamente proporcional à dureza do asfalto. A adição de polímero leva a um aumento na dureza do asfalto que pode levar a uma melhoria na deformação permanente do asfalto ([Gama et al., 2016](#); [Ge et al., 2016](#)). O uso de HDPE aumenta a rigidez da mistura asfáltica o que revela maior resistência à geração de fissuras, principalmente em áreas de clima quente ([Moussa et al., 2020](#)). Um estudo conduzido por [Bala et al. \(2017\)](#) também revelou que o HDPE

tem um forte efeito sobre o ligante puro conforme indicado pela redução dos valores de penetração e consequente aumento da rigidez. A intensa redução da penetração deveu-se à difusão da fração de óleo dentro dos maltenos na fase polimérica que causa maiores interações e inchamento entre o modificador do polímero HDPE e os asfaltenos (moléculas polares do ligante).

Por outro lado, com a incorporação do óleo vegetal de soja, a penetração do asfalto modificado com HDPE aumentou de forma acentuada com o incremento do teor de óleo vegetal de soja de 0 – 7 wt%. A adição de 1 e 3 wt% de óleo aumentou a penetração do asfalto modificado com HDPE em 24 e 69 wt% respectivamente. De acordo com [Rasman *et al.* \(2018\)](#), altos valores de penetração levam à diminuição da dureza, produzindo ligantes com bom desempenho e resistência à fissuração em baixas temperaturas. Essas melhorias podem ser explicadas pela fluidez natural característica do óleo vegetal de soja. No entanto, em temperaturas mais altas, espera-se que o ligante com maior teor de óleo vegetal de soja tenha um menor desempenho na resistência à deformação permanente, uma vez que os aglutinantes de maior penetração são macios e incapazes de resistir à exposição a altas temperaturas ([Xu *et al.*, 2021](#)). Assim, a escolha de um teor adequado de óleo vegetal de soja é fundamental para otimizar o desempenho em alta temperatura do asfalto modificado. O valor de penetração é uma indicação da suavidade do asfalto. O asfalto com alto valor de penetração é classificado como macio e pode ser usado em regiões de clima frio. Por outro lado, o asfalto com baixo valor de penetração é classificado como duro e pode ser usado em regiões climáticas quentes ([Al-Omari *et al.*, 2018](#)).

4.2. Ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento define o fluxo plástico do asfalto e reflecte a sua estabilidade a altas temperaturas. Geralmente, quanto maior o ponto de amolecimento, mais estável é o asfalto em altas temperaturas ([Bala *et al.*, 2017](#); [Fang *et al.*, 2013](#)). Os resultados obtidos para a determinação das temperaturas de amolecimento estão apresentados na Figura 21, em comparação com o ligante asfáltico não modificado, o ponto de amolecimento do composto asfalto/HDPE é aumentado em 15°C, o que indica melhorias na resistência ao escoamento ([Attaelmanan *et al.*, 2011](#); [Gama *et al.*, 2016](#); [Gibreil e Feng, 2017](#)). A alta resistência dos polímeros em temperaturas elevadas, em comparação com o asfalto puro, é a razão por trás do aumento do ponto de amolecimento da mistura resultante asfalto/HDPE. No entanto, a adição de óleo vegetal de soja diminuiu continuamente o ponto de amolecimento da mistura asfalto/HDPE/óleo. Conforme afirmado por

Xu *et al.* (2021), um valor mais alto de ponto de amolecimento do asfalto descreve uma maior estabilidade do ligante sob altas temperaturas de serviço para aplicações de pavimentação. Por outro lado, compósitos ternários com maior teor de óleo vegetal de soja apresentam maior susceptibilidade à variação de temperatura e menos resistência à deformação permanente.

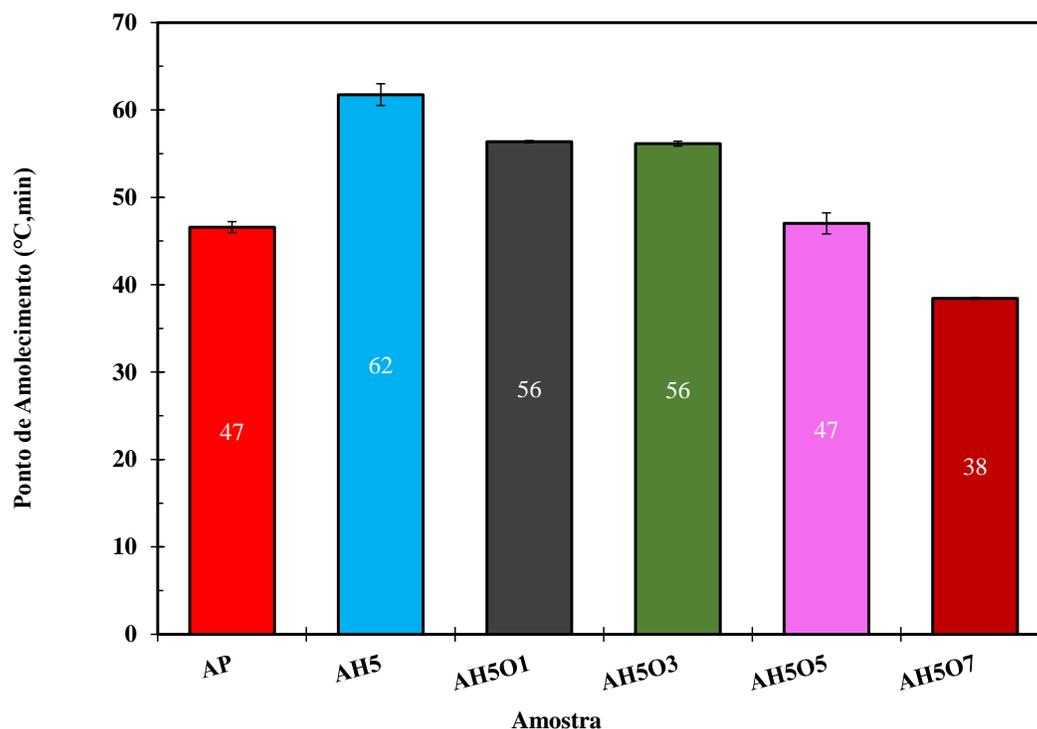


Figura 21. Resultados de ponto de amolecimento das amostras

Os óleos suavizam o asfalto reduzindo o teor de asfaltenos de alta massa molecular e aumentam o teor de maltenos de baixa massa molecular presentes no asfalto (Adesina e Dahunsi, 2020; Attaelmanan *et al.*, 2011; Ibrahim, 2019; Prasad, 2015). A partir dos resultados dos testes de penetração e ponto de amolecimento é perceptível que composições com mais de 3 wt% de óleo vegetal de soja levam a um baixo desempenho em altas temperaturas.

A amostra AH507, preparada com 7 wt% de óleo vegetal de soja, apresentou ponto de amolecimento relativamente baixo e alto valor de penetração. Esta amostra amolece a 38°C, temperaturas normalmente registradas em países de clima tropical e abaixo das temperaturas máximas alcançadas no verão (45°C). Resultados obtidos por Portugal (2016) em seu estudo revelam que a adição de óleo vegetal de soja e de milho ao asfalto tornam a mistura mole, reduzem a consistência e este comportamento reflecte-se nos valores crescentes de penetração e redução do

ponto de amolecimento. Resultado similar foi obtido em um estudo realizado por [Id et al. \(2021\)](#). De acordo com as especificações LNEC E 80 os valores mínimo e máximo do ponto de amolecimento para o asfalto 50/70 são de 46°C e 54°C respectivamente, estando as amostras de asfalto puro e com os teores de 5 wt% e 7 wt%, de óleo de soja enquadrados nos padrões normativos.

4.3. Índice de susceptibilidade térmica (PI)

O índice de susceptibilidade térmica (PI) representa a medida da resposta do asfalto às variações de temperatura. A sensibilidade do asfalto foi determinada por PI usando os valores de penetração e ponto de amolecimento. O asfalto é um material sensível à temperatura, apresentando diversas propriedades em diferentes temperaturas de serviço rodoviário. De acordo com a Figura 22, após a modificação com 5 wt% de HDPE, o valor de PI aumentou, ou seja, a mistura de HDPE/asfalto modificado é menos suscetível à temperatura.

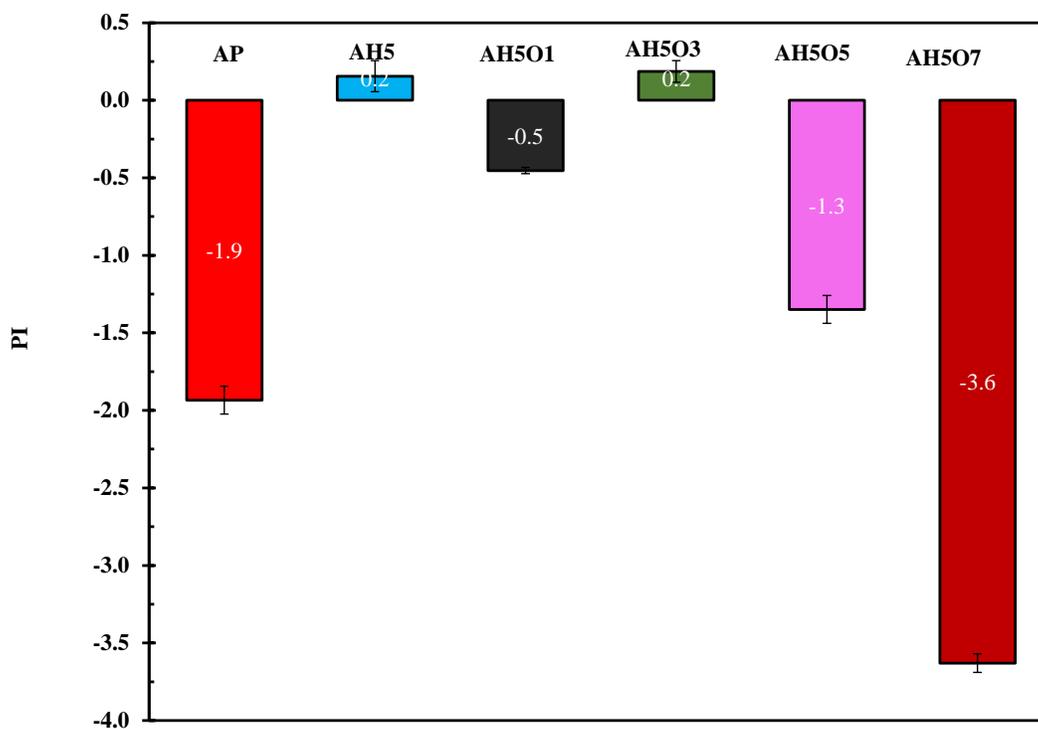


Figura 22. Índice de susceptibilidade térmica

A incorporação do óleo vegetal de soja tem uma influência significativa no desempenho do asfalto modificado em altas temperaturas. O asfalto puro apresentou um valor de PI de -1,9, o que mostra que é severamente afetado pelas mudanças de temperatura. De acordo com [Lesueur \(2009\)](#), o valor

de PI é um bom indicador do tipo de asfalto, sendo $PI > 2$ indicativo de um asfalto em gel, enquanto $PI < 0$ um asfalto sol típico. Assim, no presente estudo, os procedimentos utilizados para modificação do asfalto não alteraram a estrutura interna do ligante. Além disso, para fins de pavimentação, os valores de PI devem variar entre -2 e +2. Assim, os valores de PI das misturas ternárias de HDPE/óleo vegetal de soja/asfalto estão dentro da faixa aceitável para pavimentação, exceto a amostra AH5O7 com 7 wt% de óleo.

4.4. Viscosidade

A viscosidade do asfalto é um parâmetro muito importante para a pavimentação, uma vez que esta representa um papel importante no processo de asfaltagem. Os ligantes asfálticos devem permanecer suficientemente fluidos ou trabalháveis em altas temperaturas, de modo que a energia necessária durante as fases de mistura, assentamento e compactação da planta seja minimizada. O viscosímetro rotacional mede a viscosidade do ligante asfáltico para avaliar sua trabalhabilidade durante os processos de mistura e compactação. O efeito da modificação do aglutinante asfáltico com HDPE e óleo vegetal de soja na viscosidade da mistura a 165 °C é apresentado na Figura 23.

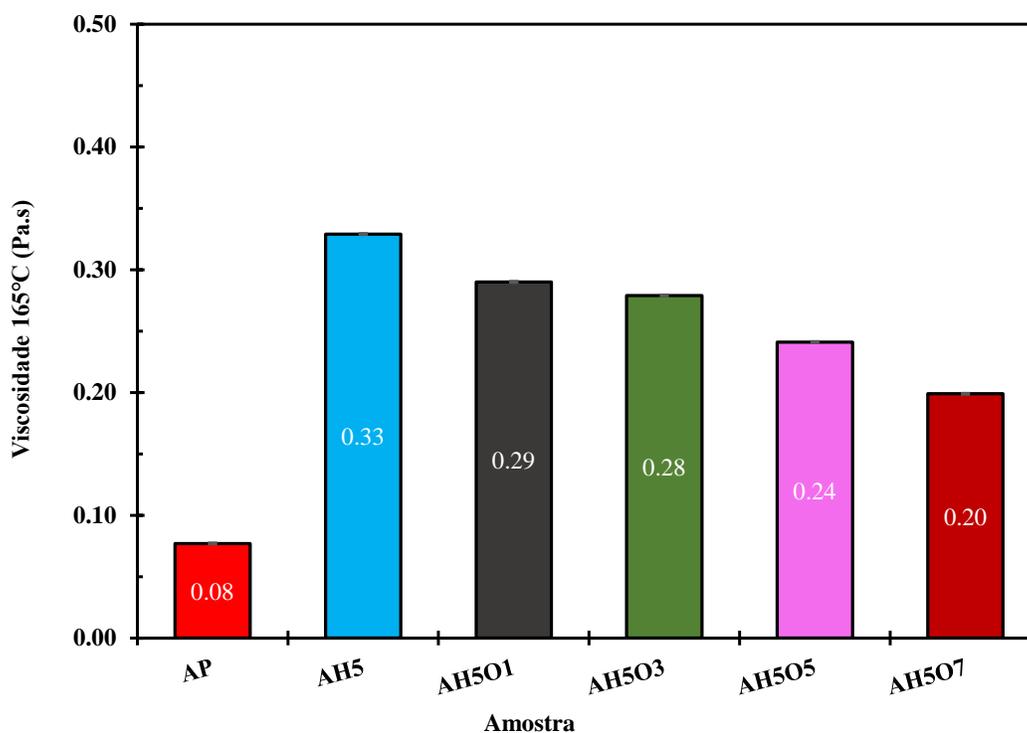


Figura 23. Resultados do teste de viscosidade dos ligantes a 165°C antes do envelhecimento

Os resultados mostram que o asfalto modificado com polímero contendo 5 wt% de HDPE aumentou 3 vezes a sua viscosidade, em comparação com o asfalto puro. Em temperaturas acima de 160°C, o HDPE está em estado fundido, absorve um pouco de óleo e liberta uma fração de baixo peso molecular no asfalto, o que aumenta a viscosidade do asfalto modificado. Esses resultados mostram que o HDPE pode melhorar a resistência interna do ligante asfáltico base e impedir o escoamento em altas temperaturas, consequentemente melhora a resistência a ruptura (Mansourian *et al.*, 2019). No entanto, como afirmado por Joni *et al.* (2020), ligantes asfálticos com alta viscosidade, apesar de apresentarem melhor desempenho em altas temperaturas, o comportamento frente a fissuração é mais fraco que o asfalto de baixa viscosidade. Além disso, uma das desvantagens mais críticas das misturas asfálticas modificadas com HDPE é que as etapas de mistura/compactação devem ser realizadas em temperaturas muito altas, mais de 40°C acima da temperatura de mistura/compactação de misturas asfálticas com ligante asfáltico não modificados. Por outro lado, a adição de óleo vegetal de soja contribuiu para a redução da viscosidade dos ligantes asfálticos, com uma tendência direta entre a quantidade de óleo vegetal de soja adicionada e a viscosidade do ligante asfáltico correspondente. Como consequência, a adição de 1, 3, 5 e 7 wt% de óleo reduziu a viscosidade em cerca de 12, 15, 29 e 39%, respectivamente, em comparação com o aglutinante de asfalto modificado com HDPE. Como esperado, e como foi encontrado por (Al-Omari *et al.*, 2018; M. Chen, Xiao, *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2016), a viscosidade do asfalto diminui à medida que o teor de óleo adicionado aumenta devido ao efeito de lubrificação que o óleo tem quando misturado com cimento asfalto e, assim, causando a diminuição da viscosidade.

A baixa viscosidade mostra que o asfalto será pouco susceptível a variações de temperatura e consequentemente reduz o potencial surgimento de rachaduras a baixas temperaturas e melhora a trabalhabilidade do asfalto (Rasman *et al.*, 2018).

Portanto, o óleo vegetal de soja melhora a trabalhabilidade do asfalto modificado devido à menor viscosidade que, por sua vez, leva a temperaturas mais baixas de mistura/compactação e maior resistência a rachaduras. De acordo com Din e Mir (2021), a diminuição das temperaturas de mistura/compactação, menos energia é necessária, menos dióxido de carbono e poluentes são libertados e o envelhecimento do ligante é evitado expondo o ligante a menos calor. Assim, a adição de óleo vegetal de soja pode facilitar o procedimento de compactação em campo da mistura

asfáltica modificada com polímero. O valor de viscosidade obtido para a amostra de asfalto com apenas 5 wt% de HDPE não satisfaz o critério (ASTM D6373, 1996) para trabalhabilidade do ligante asfáltico (viscosidade máxima 3000mPa.s).

4.5. Ductilidade

A ductilidade representa a capacidade de extensão ou alongamento do asfalto antes da fratura sob tensão. Pavimentos asfálticos com alta ductilidade tem boa durabilidade. O teste de ductilidade é comumente usado para caracterizar o desempenho antifissura do asfalto. Como pode ser visto na Figura 24, o asfalto puro possui uma excelente propriedade de extensão devido à alta ductilidade (valores acima de 100 cm não foram registrados, uma vez que estão acima do limite de detenção do equipamento).

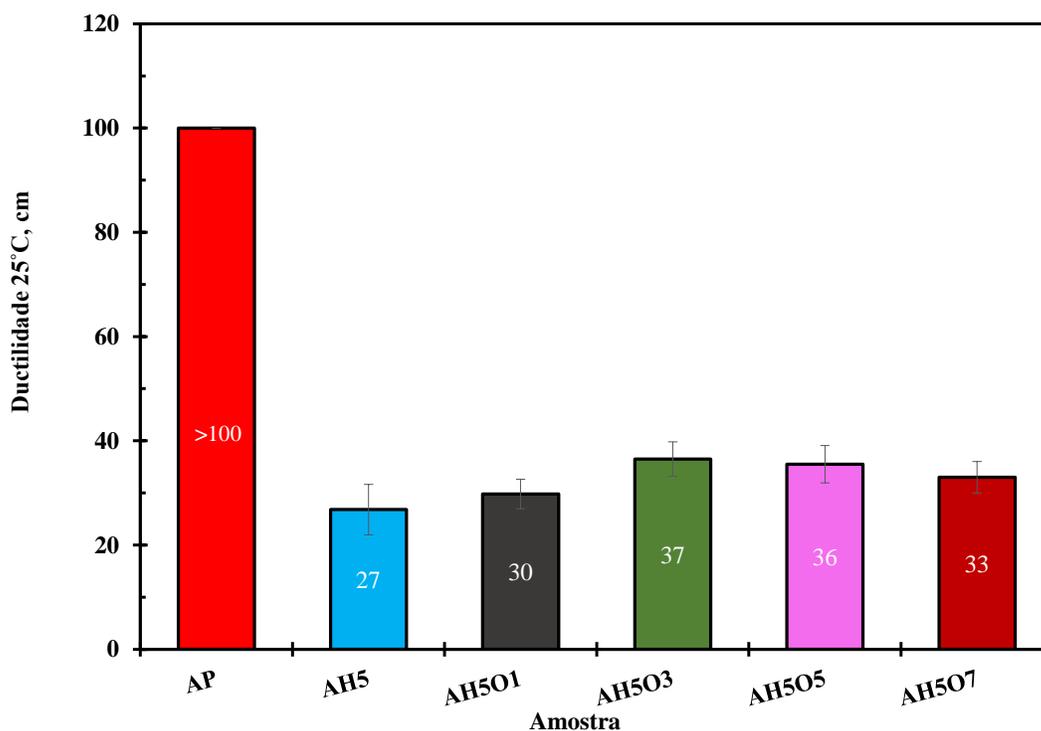


Figura 24. Resultados de teste de ductilidade a 25°C antes do RTFO

Quando 5 wt% de HDPE foi adicionado ao asfalto puro, a ductilidade do asfalto modificado apresentou uma diminuição esperada, semelhante aos resultados obtidos por Xiaoming e Eldouma (2019). A adição do óleo vegetal de soja aos ligantes compostos ternários induziu um pequeno aumento de ductilidade de 27 para 30-37 cm. Esses valores de ductilidade sugerem que os ligantes modificados se tornaram quebradiços e mais rígidos, e podem ter melhores desempenhos em

baixas temperaturas, o que pode levar a danos por humidade e resistência a rachaduras a baixas temperaturas em comparação com o asfalto modificado com HDPE. Resultados semelhantes foram relatados por [Rosyidi et al. \(2022\)](#) e [Wu et al. \(2022\)](#).

4.6. Efeito do envelhecimento oxidativo térmico nas propriedades convencionais

As amostras de asfalto foram envelhecidas por RTFO e a variação de massa, a ductilidade a 25 °C e a viscosidade a 165°C foram medidas e comparadas com as propriedades do asfalto antes do envelhecimento. A variação de massa, razão de envelhecimento de ductilidade (DAR), índice de envelhecimento de viscosidade (VAI) foram computados e são apresentados nas Figuras 25, 26 e 27, respectivamente.

Pode-se observar na figura 25 que todas as amostras ganharam massa após o processo de envelhecimento. Segundo [Manoel \(2015\)](#), durante este teste podem ocorrer dois fenômenos: oxidação (ganho de massa) e volatilização (perda de massa). Portanto, todos os ligantes estudados apresentaram algum grau de oxidação.

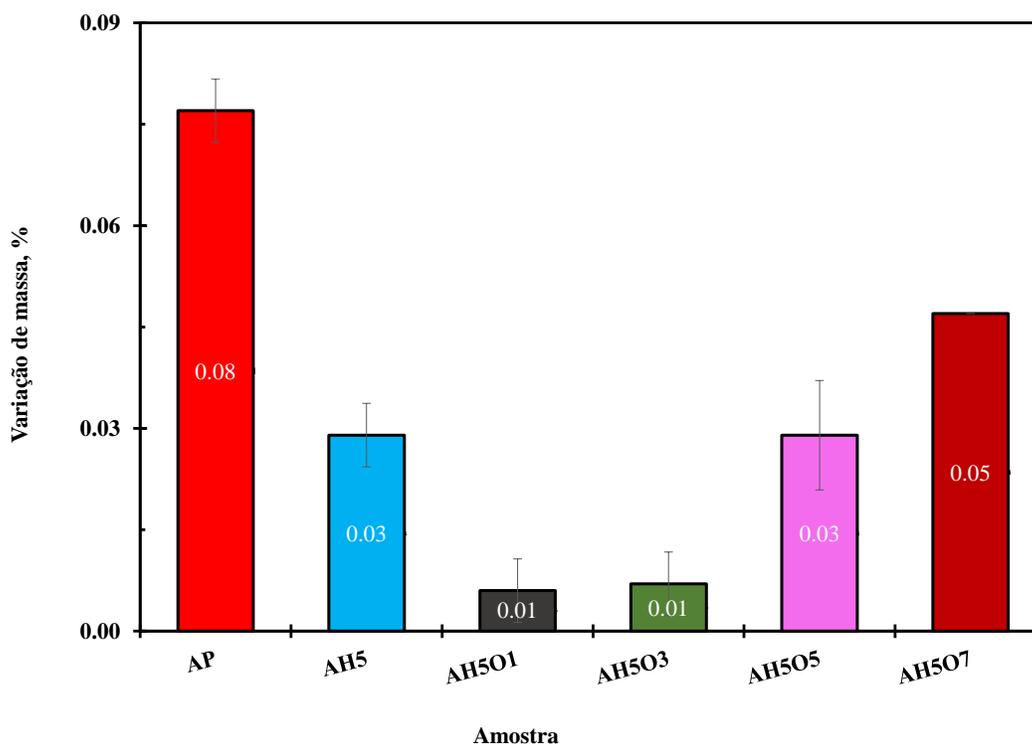


Figura 25. Variação de massa depois do teste de envelhecimento.

A oxidação do ligante ocorre primeiro para a fração malteno (aromáticos) levando à formação da fração asfalteno e consequente endurecimento e aumento da viscosidade (Fernandes *et al.*, 2008). Conforme relatado por Tauste (2018), o envelhecimento oxidativo é um fenômeno de difusão irreversível controlado principalmente por reações térmicas entre o oxigênio atmosférico e os componentes do asfalto.

No entanto, esses resultados mostram que a adição de 5 wt% de HDPE resulta na redução do ganho de massa do asfalto puro em 63%. A adição de 1 e 3 wt% de óleo vegetal de soja reduziu o ganho de massa do asfalto modificado com HDPE em 67%. No entanto, o maior teor de óleo vegetal de soja levou a um aumento no ganho de massa, mostrando indução à alta oxidação quando comparado aos ligantes com menor teor de óleo de vegetal de soja.

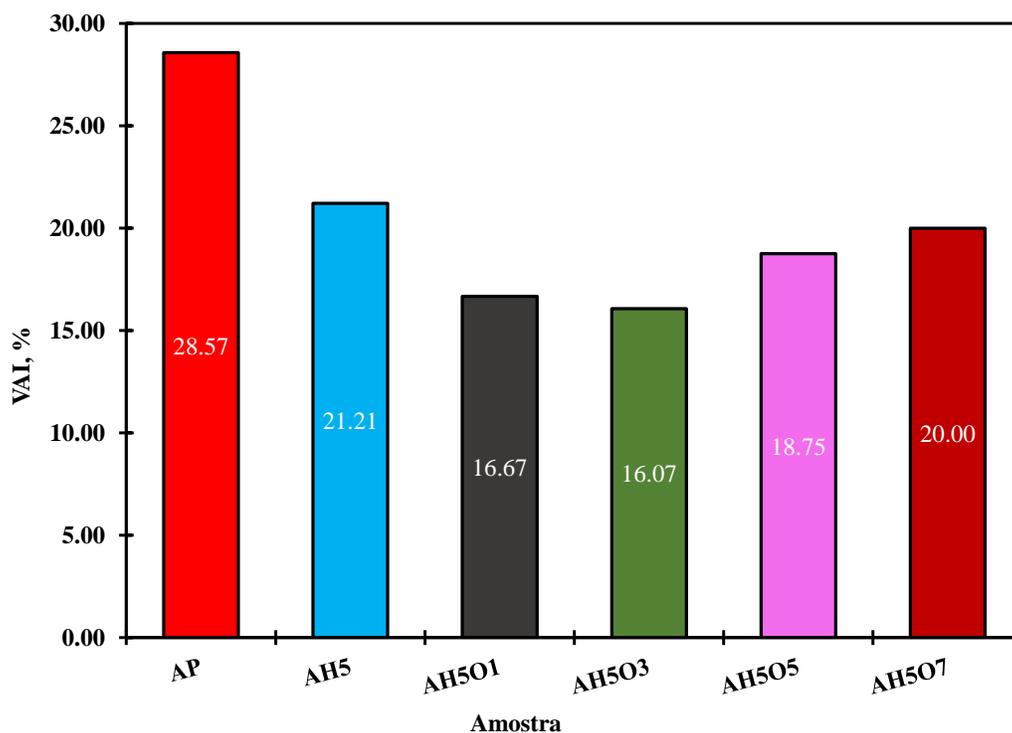


Figura 26. Resultados do VAI mostram a propriedade anti-envelhecimento dos ligantes

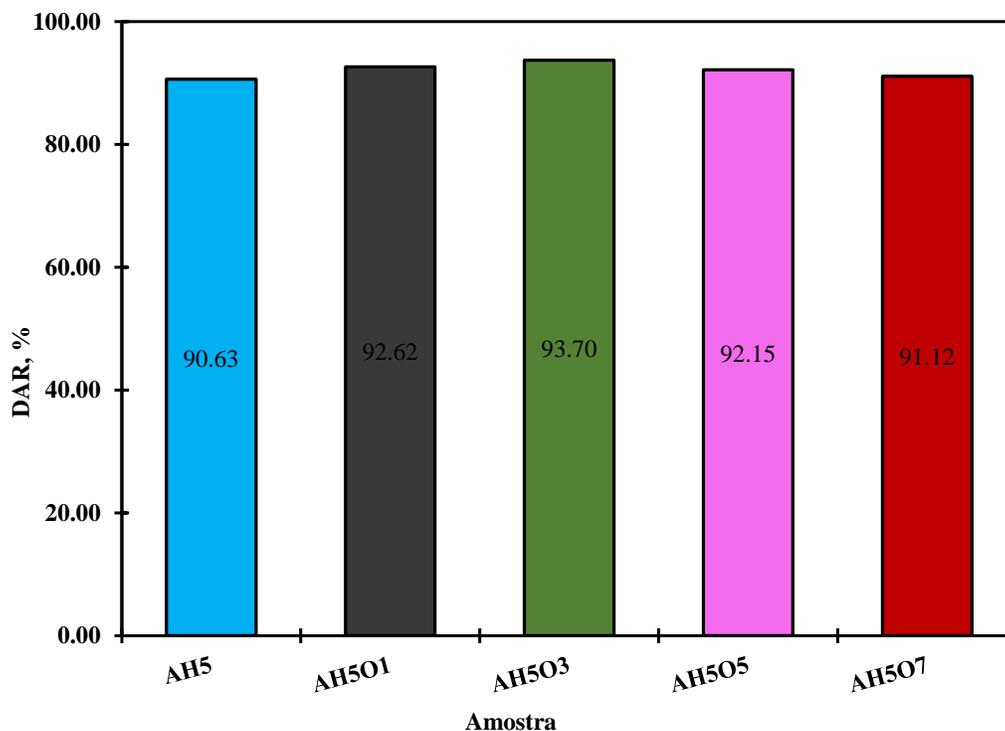


Figura 27. Resultados do DAR

Embora tenha havido um aumento no ganho de massa para ligantes com 5 e 7 wt% de óleo vegetal de soja, nenhum dos ligantes modificados apresentou ganho de massa elevado em relação ao asfalto puro. Assim, a adição simultânea de HDPE e óleo vegetal de soja até 3% em peso retardou o envelhecimento do asfalto. A adição de óleo vegetal de soja aumentou a retenção de ductilidade e diminuiu o índice de envelhecimento da viscosidade. Como também observado por [Zhang et al. \(2018\)](#), esse maior valor de retenção de ductilidade e menor incremento na viscosidade (menor VAI) reflectem menos envelhecimento dos ligantes. Portanto, a adição de óleo vegetal de soja até 3 wt% reduziu a oxidação do ligante modificado durante o envelhecimento a curto prazo. Como resultado, esses aglutinantes provavelmente sofrerão menos quando em contato com ar quente ou oxigênio quente, durante o processamento. Para [Tauste \(2018\)](#), a oxidação do asfalto sempre produz um pior desempenho da mistura asfáltica em baixa temperatura. Assim, melhorar as propriedades de envelhecimento do asfalto modificado com HDPE pela adição de óleo vegetal de soja leva a um melhor desempenho em baixas temperaturas e menor fissuração térmica. [Luo et al. \(2017\)](#) observaram em seus estudos que o óleo residual adicionado ao asfalto modificado com polímeros levou a VAI a diminuir o que conduz a uma melhor resistência ao envelhecimento do ligante asfáltico.

4.7. Análise termogravimétrica

O termograma da Figura 28 ilustra que a decomposição do óleo de soja novo e do HDPE puro ocorrem em uma etapa. A massa do óleo vegetal de soja começa a diminuir aproximadamente após 308 °C, e continua sua diminuição até que todo o óleo vegetal evapore, a temperatura máxima de degradação observada foi de 410 °C. Resultado similar foi apresentado no estudo realizado por Chand *et al.* (2009), no termograma obtido neste estudo o óleo vegetal de soja iniciou a redução de massa a uma temperatura de 350 °C. A temperatura inicial de degradação obtida para o HDPE neste estudo foi de 274°C. Awad *et al.* (2019) e Contat-Rodrigo *et al.*(2002) estudaram algumas propriedades térmicas e mecânicas da mistura de HDPE com pó de mármore e granito e obtiveram um termograma com apenas uma etapa de degradação, a curva TGA de HDPE (em nitrogénio) obtida neste estudo revela a degradação em uma etapa.

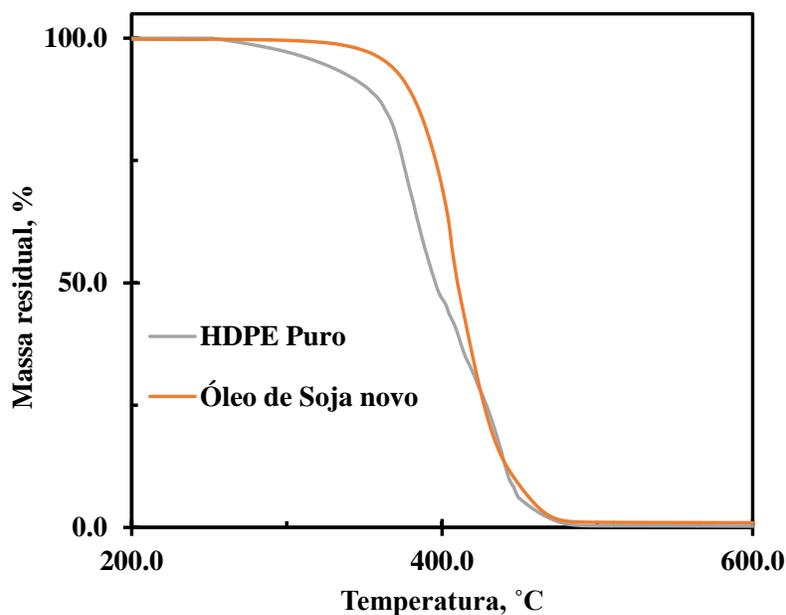


Figura 28. Termograma do HDPE e do Óleo de soja

A Figura 29 ilustra os resultados de TGA das amostras de asfalto puro e do asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja. Os dados das curvas TGA revelaram um comportamento semelhante em termos de perda de massa e todas apresentam uma única região de perda de massa.

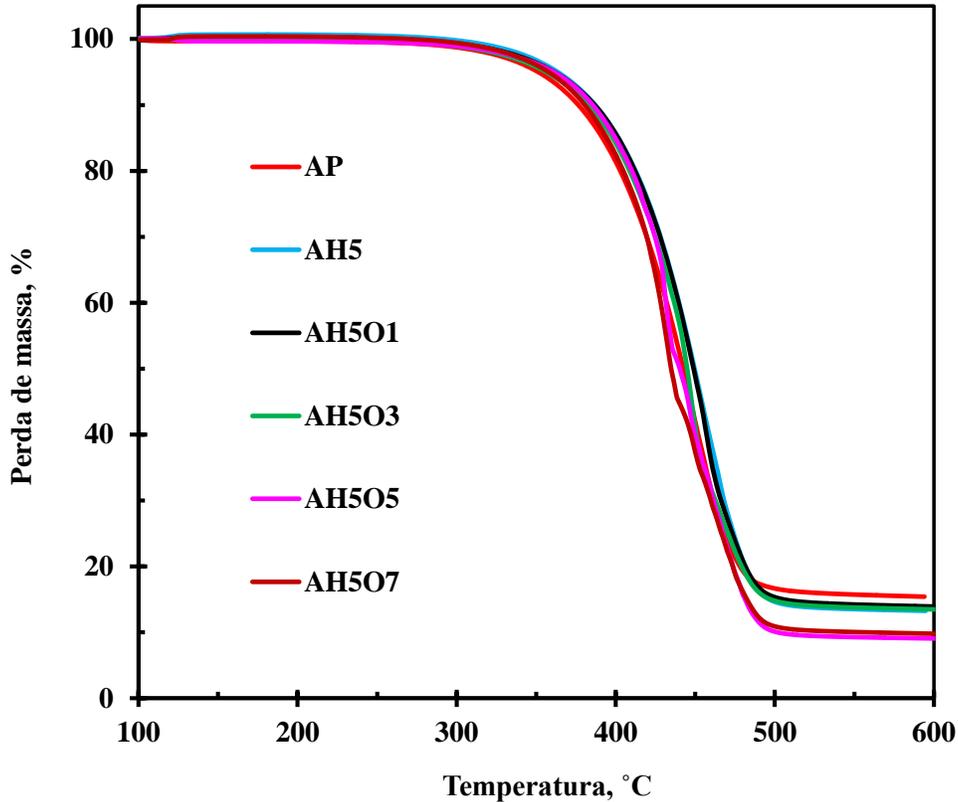


Figura 29. Termograma para amostras de asfalto puro e amostras de asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja em atmosfera de N_2 .

O asfalto puro apresentou uma temperatura inicial de degradação de 304 °C e uma massa residual de 15,42%. Considerando que os testes foram realizados em atmosfera inerte, a perda de massa está associada à evaporação ou decomposição dos componentes (Ge *et al.*, 2016). A adição do polímero elevou a temperatura inicial de degradação do asfalto puro de 304 para 325°C.

As curvas DTG (Figura 30) para os ligantes com óleo vegetal de soja mostram que há duas reações parcialmente sobrepostas ocorrendo nesses ligantes. Esse resultado vai de acordo com os resultados encontrados por Ruiz (2020).

A temperatura inicial de degradação do asfalto modificado diminuiu à medida que a concentração de óleo vegetal de soja aumenta. Este comportamento sugere uma leve perda da estabilidade térmica do asfalto modificado devido à baixa estabilidade térmica do óleo. A degradação inicial variou com a quantidade de óleo adicionada e revela ser diretamente proporcional ao valor do

índice de suscetibilidade térmica. A adição de óleo vegetal de soja ao asfalto modificado desloca a temperatura máxima de degradação das misturas para valores mais baixos.

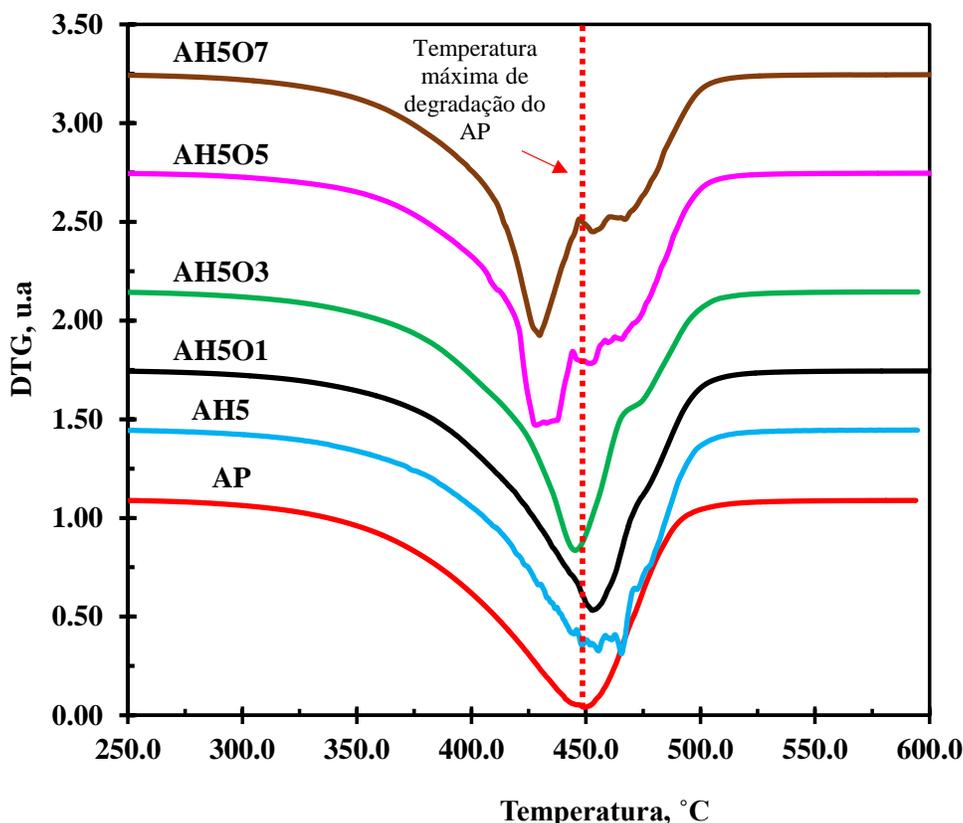


Figura 30. Curvas DTG para amostras de asfalto puro e Amostras de asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja em atmosfera de N₂.

O asfalto modificado com HDPE tem maior peso molecular do que o óleo vegetal de soja, e isso resulta na decomposição do ligante polímero/asfalto modificado a temperaturas mais altas do que os compostos asfalto/polímero/óleo de soja (Polacco *et al.*, 2022; Sánchez *et al.*, 2012). A temperatura máxima de decomposição diminuiu com o aumento do óleo vegetal de soja devido ao baixo peso molecular e à presença de compostos leves e componentes aromáticos no óleo vegetal que os tornam menos resistentes à temperatura. Por outro lado, o óleo vegetal contém muitos compostos orgânicos oxigenados, como os ácidos orgânicos. Quando os compósitos são aquecidos, a composição química do óleo vegetal muda em direção ao equilíbrio termodinâmico sob condições especiais, resultando em mudanças na estabilidade térmica. Embora a maioria dos ácidos carboxílicos sejam relativamente instáveis, as reações de carbonatação ocorreram durante

a decomposição térmica dos aglutinantes e a descarboxilação formou o monoácido e o CO₂. A maior temperatura e maior teor de óleo vegetal contribuíram para maiores reações de carbonatação e fizeram com que a resistência térmica do compósito triplo diminuísse seu desempenho. No entanto, ligantes modificados não se degradam termicamente em temperaturas reais de armazenamento e mistura (abaixo de 200°C) ou durante o estágio de construção.

Os resultados obtidos por [Grando \(2022\)](#) a partir da modificação de asfalto com alto teor de borracha (22 wt%) e diferentes teores de óleo lubrificante usado e contaminado indicam que a modificação acabou sendo positiva para a estabilidade térmica das amostras desde a degradação máxima as temperaturas foram superiores às do asfalto puro. No entanto, do ponto de vista prático, não tem efeito significativo na estabilidade térmica, pois as temperaturas de produção e compactação da mistura asfáltica são inferiores à faixa aproximada de decomposição térmica (220°C a 520°C) dos ligantes. O alto teor de borracha assim como a alta estabilidade térmica contribuíram para o aumento da temperatura máxima de degradação. Resultados similares foram relatados por [Ruiz \(2020\)](#), onde o autor atribui o primeiro pico à decomposição térmica dos principais componentes do biomaterial, e o segundo ocorre devido à pirólise do restante do resíduo gráfico.

As amostras modificadas com 5 e 7 wt% de óleo apresentam menor estabilidade térmica que se reflecte nos baixos valores de temperatura inicial de degradação. As principais características das curvas TGA e DTG são apresentadas na tabela 10.

Tabela 10. Resultados de TGA

Amostras	Temperatura, °C			Resíduo, wt% (25 – 600°C)
	d _i	d _{max}	d _f	
AP	304	450	511	15.42
AH5	325	465	522	13.27
AH5O1	319	455	511	13.14
AH5O3	315	457	515	13.51
AH5O5	312	433	513	8.47
AH5O7	307	429	515	8.44

Onde, d_i – temperatura de degradação inicial; d_{max} – temperatura máxima degradação e d_f – temperatura final de degradação.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Neste estudo foi feita a avaliação da adição do óleo vegetal de soja sobre as propriedades do asfalto modificado com polietileno de alta densidade (5 wt%). Os resultados mostram que todas as amostras preparadas pelo método de via húmida apresentaram uma característica homogênea.

A adição de óleo vegetal de soja conduziu a um aumento gradual nos valores de penetração do asfalto modificado que variaram de 36 a 81 dmm, onde a amostra com 7% de óleo vegetal de soja apresentou o maior valor de penetração. Os resultados obtidos do ensaio de anel e bola mostram uma tendência oposta a verificada nos valores de penetração com a adição de teores de óleo vegetal de soja. Os valores de ponto de amolecimento diminuem com a adição do óleo, por outro lado a adição do óleo aumenta o índice de susceptibilidade térmica do asfalto modificado. Compósitos ternários com 5% e 7 % de óleo vegetal de soja apresentaram maior susceptibilidade à variação de temperatura. O óleo melhorou a trabalhabilidade do asfalto modificado. A viscosidade do asfalto modificado diminuiu à medida que o teor de óleo adicionado aumenta, a maior percentagem de redução (39%) foi obtida para a amostra com 7% de óleo vegetal de soja.

A adição do óleo vegetal de soja mitigou o efeito negativo nos valores de ductilidade causado pela adição de HDPE no asfalto, foi possível recuperar a ductilidade de 27cm para 37 cm valor máximo de ductilidade obtido para a amostra com 3% de óleo vegetal. Os resultados do RTFO revelaram que a adição de até 3% de óleo conduz a redução da oxidação do asfalto modificado, por outro lado, acima de 5% as amostras tendem a ser mais susceptíveis a oxidação. O DAR e o VAI mostram que a adição de óleo retardou o envelhecimento do asfalto. Todas as amostras apresentaram boa estabilidade térmica. A temperatura de degradação máxima do asfalto reduziu com a adição de óleo onde o menor valor obtido foi de 429°C na amostra com 7% de óleo.

A mistura ternária com uma combinação de 5 wt% de HDPE e 3 wt% de óleo vegetal de soja, apresentou os melhores resultados, com baixa suscetibilidade a variações de temperatura, valor de penetração próximo ao asfalto puro (grau de penetração 50/70), bem como um baixo percentual de mudança de massa (0,01%) quando submetido ao teste de envelhecimento.

O óleo vegetal de soja pode ser usado como aditivo para melhoria da trabalhabilidade do asfalto modificado com polietileno de alta densidade em condições de serviço.

5.2. Recomendações

- Embora as análises realizadas nesta pesquisa tenham fornecido uma indicação promissora do desempenho do asfalto modificado com HDPE e óleo vegetal de soja, uma avaliação mais abrangente é recomendada com diferentes testes, como o desempenho a longo prazo, para avaliar o efeito no armazenamento e resistência a trincas sob várias condições de tráfego.
- Recomenda-se a análise das amostras puras e modificadas por microscopia electrónica de varredura e ensaios reológicos em reómetro de cisalhamento.
- Recomenda-se um estudo económico para determinar os custos envolvidos na modificação do asfalto por polímeros e óleo vegetal de soja;
- Do ponto de vista do impacto ambiental recomenda-se o uso de polímeros e óleo vegetal reciclados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adesina, P. A., & Dahunsi, B. I. (2020). Blended waste utilization in road construction : physical characteristics of bitumen modified with waste cooking oil and high-density polyethylene. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1–7.
2. Adlinge, S. S., & Gupta, P. a K. (2009). Pavement Deterioration and its Causes. *Mechanical & Civil Engineering*, 9–15. www.iosrjournals.org
3. Al-Omari, A. A., Khedaywi, T. S., & Khasawneh, M. A. (2018). Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(1), 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.004>
4. Alaamri, R. S. N., Kattiparuthi, R. A., & Koya, A. M. (2017). Evaluation of Flexible Pavement Failures-A Case Study on Izki Road. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, 3(7), 741–749. <https://doi.org/10.24001/ijaems.3.7.6>
5. Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G. G., Antle, C. E., & Button, J. (1994). *Binder Characterization and Evaluation*. 3, 475. <https://doi.org/http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-369.pdf>
6. Appiah, J. K., Berko-Boateng, V. N., & Tagbor, T. A. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.001>
7. Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., & Karim, M. R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 37, 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042>
8. ASTM, D005. (2006). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials 1. i*, 4–7.
9. ASTM D036. (2014). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus) 1*. <https://doi.org/10.1520/D0036>
10. ASTM D113. (2015). *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials 1. i*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D0113-17.aware>
11. ASTM, D2872. (2019). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test) 1*. 1–6. <https://doi.org/10.1520/D2872>

12. ASTM, D4402. (2002). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer 1*. 14(July), 10–12.
13. ASTM D6373. (1996). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder 1 ment for Use in Pavement Construction 3 for Use in Pavement Construction 3*. 04, 3–5.
14. Attaelmanan, M., Feng, C. P., & Ai, A. H. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2764–2770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037>
15. Awad, A. H., El-wahab, A. A. A., El-gamsy, R., & Abdel-latif, M. H. (2019). A study of some thermal and mechanical properties of HDPE blend with marble and granite dust. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(2), 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.005>
16. Baker, B. P., Grant, J. A., & Malakar-kuenen, R. (2018). Soybean Oil Profile. *New York State Integrated Pest Management, Cornell Cooperative Extension*, 1–11.
17. Bala, N., Kamaruddin, I., Napiah, M., & Danlami, N. (2017). Rheological and rutting evaluation of composite nanosilica / polyethylene modified bitumen Rheological and rutting evaluation of composite nanosilica / polyethylene modified bitumen. *Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/201/1/012012>
18. Banerjee, D. (1993). Experimental Techniques in Thermal Analysis Thermogravimetry (TG) & Differential Scanning Calorimetry (DSC). *Analytical Proceedings*, 12, 469–508.
19. Barros, A. G. de, Ziegler, C. R., Costa, D. B., Silva, C. C. V. P. da, Costa, L. F. da, & Lucena, L. C. de F. L. (2017). *Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do óleo da soja e do óleo de milho* (pp. 1–13). <https://doi.org/https://doi.org/10.14295/transportes.v27i1.1594>
20. Becker, Y., Méndez, M. P., & Rodríguez, Y. (2001). Polymer Modified Asphalt. *Vision Tecnologica*, 9(1), 40–50.
21. Behnood, A., & Gharehveran, M. M. (2019). Morphology , rheology , and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112(September 2018), 766–791. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
22. Bernucci, L. B., Motta, L. M. G. da, Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B. (2008). *Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros*.
23. Bernucci, L. B., Motta, L. M. G. da, Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B. (2010). *Pavimentação asfáltica Formação básica para engenheiros* (3rd ed.).

24. Błażejowski, K., Olszacki, J., & Hubert, P. (2014). *Bitumen Handbook* (O. Asphalt (ed.)).
25. Blazejowski, K., Wojcik-Wisniewska, M., Baranowska, W., & Ostrowski, P. (2021). *Bitumen Handbook* (Orlen Asphalt (ed.)).
26. Botaro, V. R., Castro, S. R., Rodrigues Junior, F., & Cerantola, A. E. (2006). Obtenção e caracterização de blendas de asfalto CAP 20, modificado com poliestireno reciclado, resíduos de pneu e lignina organossolve. *Rem: Revista Escola de Minas*, 59(1), 117–122. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672006000100015>
27. Brown, M. (1989). Introduction to thermal analysis, techniques and applications. In *Thermochimica Acta* (Second edi, Vol. 1). Kluwer Academic Publisher. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(89\)87162-X](https://doi.org/10.1016/0040-6031(89)87162-X)
28. Brûlé, B. (1996). Polymer-Modified Asphalt Cements Used in the Road Construction Industry: Basic Principles. In *Transportation Research Record 1535* (pp. 48–53). <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/1535-07>
29. Calado, L. M. (2015). *Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos: Estudo da sua Reologia e Extrusão* [Universidade de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10451/20739>
30. Canevarolo Junior, S. V. (2006). *Ciência dos polirneros: um teste básico para tecnólogos e engenheiros* (Artliber (ed.); 2ª edição). Artliber Editora.
31. Carraher Jr, C. E. (2003). Polymer chemistry. In *Polymer Chemistry* (Sixth edit). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-741-9.50002-1>
32. Celauro, B., Celauro, C., Lo Presti, D., & Bevilacqua, A. (2012). Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, 37, 562–572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.034>
33. Chand, P., Reddy, C. V., Venkat, J. G., Wang, T., & Grewell, D. (2009). Thermogravimetric quantification of biodiesel produced via alkali catalyzed transesterification of soybean oil. *Energy and Fuels*, 23(2), 989–992. <https://doi.org/10.1021/ef800668u>
34. Chanda, M. (2006). Introduction to polymer science and chemistry: A problem-solving approach. In *Introduction to Polymer Science and Chemistry: A Problem-Solving Approach* (Second Edi). CRC Press.
35. Chen, C., Podolsky, J. H., Williams, R. C., & Cochran, E. W. (2018). Laboratory investigation of using acrylated epoxidized soybean oil (AESO) for asphalt modification.

- Construction and Building Materials*, 187, 267–279.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.204>
36. Chen, M., Leng, B., Wu, S., & Sang, Y. (2014). Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 66, 286–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.033>
37. Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B., & Wu, S. (2014). High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials*, 59, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032>
38. Contat-Rodrigo, L., Ribes-Greus, A., & Imrie, C. T. (2002). Thermal analysis of high-density polyethylene and low-density polyethylene with enhanced biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*, 86(3), 764–772. <https://doi.org/10.1002/app.10974>
39. Dijkstra, A. J. (2015). Soybean Oil. In *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 58–63). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00638-3>
40. Diltata Dilgba, S. (2018). Assessment of Pavement Surface Defects & Its Mitigation Measures: Case Study of Hawassa City, Ethiopia. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, 04(04), 2454–9150.
41. Din, I. M. U., & Mir, M. S. (2021). Experimental investigation of low viscosity grade binder modified with Fischer Tropsch-Paraffin wax. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(2), 129–137. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0286-7>
42. DNIT. (2005). IPR 710 Manual de Conservação Rodoviária. *Ipr 710*, 568. [http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual de Conservacao Rodoviaria.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Conservacao%20Rodoviaria.pdf)
43. Ebeuele, R. O. (2000). Polymer science and technology. In *Polymer Science and Technology*. RCR Press. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(95\)90127-2](https://doi.org/10.1016/0261-3069(95)90127-2)
44. Fang, C., Yu, R., Li, Y., Zhang, M., & Hu, J. (2013). Preparation and characterization of an asphalt-modifying agent with waste packaging polyethylene and organic montmorillonite. *Polymer Testing*, 32(5), 953–960. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.04.006>
45. Fedelich, N., Giani, S., Jing, E. H. N., Nijman, M., Riesen, R., Schawe, J., & Schubnell, M. (2013). *Thermal Analysis of Polymers*. METTLER TOLEDO. (www.mt.com/ta-

usercoms

46. Fernandes, M. R. S., Forte, M. M. C., & Leite, L. F. M. (2008). Rheological evaluation of polymer-modified asphalt binders. *Materials Research*, 11(3), 381–386. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392008000300024>
47. Gama, D. A., Rosa, J. M., De Melo, T. J. A., & Rodrigues, J. K. G. (2016). Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Materials*, 106, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.142>
48. Gawande, A., Zamare, G., Renge, V. C., Tayde, S., & Bharsakale, G. (2012). An overview on waste plastic utilization in asphaltting of roads. *Journal of Engineering Research*, III(II), 1–5.
49. Ge, D., Yan, K., You, Z., & Xu, H. (2016). Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene. *Construction and Building Materials*, 126, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.014>
50. Ghuzlan, Al-Khateeb, G. G., & Qasem, Y. (2015). Rheological Properties of Polyethylene-Modified Asphalt Binder. *Athens Journal of Technology & Engineering*, 2(2), 75–88. <https://doi.org/10.30958/ajte.2-2-1>
51. Ghuzlan, B. K. A. (1997). *Rheological Properties of Polyethylene-Modified Asphalt Binder*. 1–14.
52. Gibreil, H. A. A., & Feng, C. P. (2017). Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 142, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.062>
53. Gigante, A. C. (2007). *Avaliação Da Susceptibilidade Térmica E Do Efeito Das Condições Ambientais No Enrijecimento De Misturas Asfálticas Densas À Luz De Seus Comportamentos Resilientes* [Universidade de São Paulo]. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-19032008-135756/publico/ACG.pdf>
54. Glover, I. C. (2007). *Wet and dry aging of polymer-asphalt blends : chemistry and performance* [Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College]. https://doi.org/https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations
55. Gotame, Y. N. (2016). *Relationship between Physical and Chemical Properties of Straight and Recovered Asphalt Binders from Ontario*. 116.

56. Grando, A. J. (2022). *Avaliação do óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) como agente redutor de viscosidade do asfalto-borracha* (Issue 8.5.2017) [Universidade Federal da Integração Latino-Americana]. <http://dspace.unila.edu.br/123456789/6853>
57. Guerra, E. S., & Lima, E. V. (2013). *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing*. In Wiley. Wiley. [https://www.wiley.com/en-ec/Handbook+of+Polymer+Synthesis,+Characterization,+and+Processing-p-9780470630327](https://www.wiley.com/en/ec/Handbook+of+Polymer+Synthesis,+Characterization,+and+Processing-p-9780470630327)
58. Gustone, F. D. (2002). *Vegetable Oils in Food Technology*. In *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (CRC). Wiley. <https://doi.org/10.1002/047167849X.bio055.pub2>
59. Haghshenas, H. F., Rea, R., Reinke, G., Yousefi, A., Haghshenas, D. F., & Ayar, P. (2021). Effect of Recycling Agents on the Resistance of Asphalt Binders to Cracking and Moisture Damage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003921](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003921)
60. Hamela, H., & Pimpão, A. (2021). *Desafios E Oportunidades No Desenvolvimento Da Agroindústria Em Moçambique*.
61. Hammond, E. W. (2003). *Vegetable oils/Types and Properties* (Second edi, Issue March 1990, pp. 14–16). Elsevier Science Ltd.
62. Hatakeyama, T., & Quinn, F. . (1999). Thermal analysis: Fundamentals and applications to polymer science. In *Thermochimica Acta* (Second Edi, Vol. 256, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)91503-6](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)91503-6)
63. Ibrahim, A. A. (2019). Laboratory investigation of aged HDPE-modified asphalt mixes. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1–5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42947-019-0043-y>
64. Id, X. Y., Zou, X., Tian, F., & He, H. (2021). *Feasibility study on recycled vegetable oil waste and recycled polyethylene for the modification of aged asphalt*. 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244159>
65. Institute Asphalt, B. (2015). The Bitume Industry - A global perspective. In *Asphalt Institute* (Vol. 10, Issue 2).
66. Jafar, J. J. (2016). Utilisation of waste plastic in bituminous mix for improved performance of roads. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 243–249. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0511-0>

67. Joni, H. H., Al-Rubaei, R. H. A., & Al-Zerkani, M. A. (2020). Characteristics of asphalt binder modified with waste vegetable oil and waste plastics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012126>
68. Kalantar, Z. N., Karim, M. R., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*, 33, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>
69. Karak, N. (2012). Vegetable oils and their derivatives. In *Vegetable Oil-Based Polymers* (pp. 54–95). <https://doi.org/10.1533/9780857097149.54>
70. Kashem, M. A. (2012). *Use of waste plastic blended bitumen for road construction and maintenance* [Bangladesh University of Engineering And Technology]. <http://lib.buet.ac.bd:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/443/FullThesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
71. Kim, H., Buttlar, W. G., & Ab, A. B. À. M. (2009). Multi-scale fracture modeling of asphalt composite structures. *Composites Science and Technology*, 69(15–16), 2716–2723. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.08.014>
72. Kumar, A., & Gupta, R. K. (2003). Fundamentals of Polymer Engineering. In *Fundamentals of Polymer Engineering, Revised and Expanded* (Second Edi). Macel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203911891>
73. Kumar, S. (2014). *Conversion of waste high-density polyethylene into liquid fuels*. National Institute of Technology.
74. Lei, Y., Wang, H., Chen, X., Yang, X., You, Z., Dong, S., & Gao, J. (2018). Shear property, high-temperature rheological performance and low-temperature flexibility of asphalt mastics modified with bio-oil. *Construction and Building Materials*, 174, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.094>
75. Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 145, Issues 1–2, pp. 42–82). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
76. Li, H., Dong, B., Wang, W., Zhao, G., Guo, P., & Ma, Q. (2019). applied sciences Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt. *Appl. Sci*, 9, 1–20. <https://doi.org/10.3390/app9091767>

77. Liang, M., Xin, X., Fan, W., Wang, H., Jiang, H., Zhang, J., & Yao, Z. (2019). Phase behavior and hot storage characteristics of asphalt modified with various polyethylene : Experimental and numerical characterizations. *Construction and Building Materials*, 203, 608–620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.095>
78. Liu, S., Peng, A., Wu, J., & Zhou, S. B. (2018). Waste engine oil influences on chemical and rheological properties of different asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 191, 1210–1220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.126>
79. LNEC. (1997). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Classificação, propriedades e exigências de conformidade. In *Especificação LNEC E80* (pp. 1–11).
80. Lucena, M. D. C. C. (2005). *Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros*. 163. <http://www.repositorio.ufc.br:8080/ri/handle/123456789/2080>
81. Luo, W., Zhang, Y., & Cong, P. (2017). Investigation on physical and high temperature rheology properties of asphalt binder adding waste oil and polymers. *Construction and Building Materials*, 144, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.105>
82. Mailer, R. J. (2016). The Oilseeds Oilseeds : Overview. In *Encyclopedia of Food Grains* (2nd ed.). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00026-7>
83. Manoel, G. F. (2015). *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*. Universidade Federal De Minas Gerais Escola.
84. Mansourian, A., Rezazad, A., & Karimian, F. (2019). Performance evaluation of asphalt binder modified with EVA / HDPE / nanoclay based on linear and non-linear viscoelastic behaviors. *Construction and Building Materials*, 208, 554–563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.065>
85. Marín-Genescà, M., Rosas, R. M., Amorós, J. G., Vidal, L. M., & Fajula, X. C. (2021). Influence of tire rubber particles addition in different branching degrees polyethylene matrix composites on physical and structural behavior. *Polymers*, 13(19), 1–14. <https://doi.org/10.3390/polym13193213>
86. Meran, C., Ozturk, O., & Yuksel, M. (2008). Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene. *Materials and Design*, 29(3), 701–705. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.02.007>

87. Moghadas, F., & Mohsen, N. (2014). *Evaluation of rutting properties of high density polyethylene modified binders*. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0399-z>
88. Mohomed, K. (2016). Thermogravimetric Analysis (TGA) Theory and Applications. *TA Instruments*, 4–235. <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2tG2B4rkrwJ:www.tainstruments.com/wp-content/uploads/CA-2016-TGA.pdf+&cd=20&hl=en&ct=clnk&client=firefox-b>
89. Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2014). Reuse of deconstructed tires as anti-reflective cracking mat systems in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 53, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.101>
90. Moussa, G. S., Abdel-raheem, A., & Abdel-wahed, T. (2020). Investigating The Moisture Susceptibility Of Asphalt Mixtures Modified With High-Density Polyethylene. *Journal of Engineering Sciences*, 48(5), 765–782. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2020.39052.1001>
91. Panda, M., & Mazumdar, M. (2002). Utilization of Reclaimed Polyethylene in Bituminous Paving Mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 527–530. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2002\)14:6\(527\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2002)14:6(527))
92. Pereira, A. G., Silva, R. L. da, & Vieira, C. da S. (2021). Ligantes asfálticos modificados: Uma análise bibliográfica. *Research, Society and Development*, 10(4), e35710414321. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14321>
93. Polacco, G., Berlincioni, S., Biodi, D., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*, 41(41), 2831–2844. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034>
94. Polacco, G., Cappello, M., Cuciniello, G., & Filippi, S. (2022). Apparent Molecular Weight Distributions in Bituminous Binders. *Materials*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/ma15134700>
95. Pontel, C. E. (2016). *Síntese e propriedades do óleo de soja funcionalizado com grupos hidroxílicos para aplicação em poliuretanos*. Universidade De São Paulo.
96. Portugal, A. C. X. (2016). *Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho* [Universidade Federal De Campina Grande Centro]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.204>

97. Prasad, K. V. R. (2015). Use of PET (poly ethylene teraphthalate) waste in Bituminous Road Construction –A Critical review. *International Journal of Emerging Technologies and Engineering (IJETE)*, 2(4), 96–99.
98. Punith, V. S., & Veeraragavan, A. (2007). *Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed*. June, 500–507.
99. Punith, V. S., & Veeraragavan, A. (2011). *Behavior of Reclaimed Polyethylene Modified Asphalt Cement for Paving Purposes*. June, 833–845. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533)
100. Punith, V. S., Veeraragavan, A., & Amirkhaniyan, S. N. (2011). Evaluation of reclaimed polyethylene modified asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(1), 1–10.
101. Radeef, H. R., Hassan, N. A., Katman, H. Y., Mahmud, M. Z. H., Abidin, A. R. Z., & Ismail, C. R. (2022). The mechanical response of dry-process polymer wastes modified asphalt under ageing and moisture damage. *Case Studies in Construction Materials*, 16(November 2021), e00913. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00913>
102. Radziszewski, P. (2007). Modified asphalt mixtures resistance to permanent deformations. *Journal of Civil Engineering and Management*, XIII(4), 307–315. <http://www.jcem.vgtu.lt>
103. Rafiq, M., Mikhailenko, P., Piao, Z., Bueno, M., & Poulikakos, L. (2021). Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 280, 122492. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122492>
104. Rahman, W. M. N. W. A., & Wahab, A. F. A. (2013). Green pavement using recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt. *Procedia Engineering*, 53, 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.018>
105. Rasman, M., Hassan, N. A., Hainin, M. R., Putra Jaya, R., Haryati, Y., Shukry, N. A. M., Abdullah, M. E., & Kamaruddin, N. H. M. (2018). Engineering properties of bitumen modified with bio-oil. *MATEC Web of Conferences*, 250. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201825002003>
106. Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *Shell Bitumen Handbook* (S. Bitumen (ed.); Fifth Edit, Issue 7).

107. Rosyidi, S. A. P., Idiajir, B., Akhir, N. M., Rahmad, S., Lestari, N. P., Widoanindyawati, V., Al-sabaei, A. M., Milad, A., Mashaan, N. S., & Yusoff, N. I. (2022). Physical , Chemical and Thermal Properties of Palm Oil Boiler Ash / Rediset-Modified Asphalt Binder. *Sustainability*, *14*, 1–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su14053016>
108. Ruiz, L. V. E. (2020). *Analysis of bio-binders for paving as a total substitute for asphalt binder* [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/https://doi.org/10.11606/D.3.2020.tde-05112020-133903>
109. Sánchez, A., Maceiras, R., Cancela, A., & Rodríguez, M. (2012). Influence of n-hexane on in Situ transesterification of marine macroalgae. *Energies*, *5*(2), 243–257. <https://doi.org/10.3390/en5020243>
110. Silva, J. P. S. (2011). *Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas* [Universidade de Brasília]. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7130/1/LUZARDO-BUIATRIA-2017.pdf>
111. Singh, S., & Kumar, D. (2021). Various Types of Road Defects in Flexible Pavement and Maintenance. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 25–33. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-720>
112. Sonibare, K., Rucker, G., & Zhang, L. (2021). Molecular dynamics simulation on vegetable oil modified model asphalt. *Construction and Building Materials*, *270*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121687>
113. Speight, J. G. (2016). *Asphalt materials science and technology*. Elsevier.
114. Sun, D., Lu, T., Xiao, F., Zhu, X., & Sun, G. (2017). Formulation and aging resistance of modified bio-asphalt containing high percentage of waste cooking oil residues. *Journal of Cleaner Production*, *161*, 1203–1214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.155>
115. Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D., & Guo, C. (2016). Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. *Construction and Building Materials*, *102*, 496–504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.173>
116. Suo, Z., Chen, H., Yan, Q., Tan, Y., Li, X., & Zhang, A. (2021). Laboratory Performance Evaluation on the Recovering of Aged Bitumen With Vegetable Oil Rejuvenator. *Frontiers in Materials*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.650809>

117. Suo, Z., Yan, Q., Ji, J., Liu, X., Chen, H., & Zhang, A. (2021). The aging behavior of reclaimed asphalt mixture with vegetable oil rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123811>
118. Swamy, A. K., Rongali, U. D., & Jain, P. K. (2017). Effect of HDPEH polymer on viscoelastic properties of SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 136, 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.049>
119. Tauste, R. (2018). Understanding the bitumen ageing phenomenon : A review. *Construction and Building Materials*, 192, 593–609. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.169>
120. Teixeira, H. S. (2018). *Estudo e caracterização de pavimentação asfáltica modificada empregando os polímeros elastoméricos látex de borracha natural (NRL) e estireno-butadieno-estireno (SBS) em sua composição* (Vol. 10, Issue 2). Universidade Federal Do Paraná.
121. W.J. Sichina. (2011). Characterization of Polymers Using TGA. *Thermal Analysis Application Note*, 1–4.
122. Walker, D. (2013). Asphalt Roads. In L. Entine (Ed.), *Under Construction* (pp. 58–91). <https://doi.org/10.1215/9781478007043-003>
123. Wang, C., Xue, L., Xie, W., You, Z., & Yang, X. (2018). Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bio-asphalt binders incorporating waste cooking oil. *Construction and Building Materials*, 167, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.038>
124. Wang, J., Yuan, J., Kim, K. W., & Xiao, F. (2018). Chemical , thermal and rheological characteristics of composite polymerized asphalts. *Fuel*, 227(April), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.100>
125. Wu, S., Xu, W., Zhang, F., & Wu, H. (2022). Effect of Polyurethane on High- and Low-Temperature Performance of Graphene Oxide-Modified Asphalt and. *Coatings MDPI*, 12, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/coatings12050590>
126. Xiao, F., Amirkhanian, S., & Juang, C. H. (2007). *Rutting Resistance of Rubberized Asphalt Concrete Pavements Containing Reclaimed Asphalt*. June, 475–483.
127. Xiaoming, H., & Eldouma, I. B. (2019). applied sciences Experimental Study to Determine the Most Preferred Additive for Improving Asphalt Performance Using

- Polypropylene , Crumb Rubber , and Tafpack Super in. *MDPI*, 9. <https://doi.org/doi:10.3390/app9081567>
128. Xu, M., Zhang, Y., & Zhao, P. (2021). Long-term aging performance study of asphalt with different composition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science PAPER*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/631/1/012050>
129. Yan, K., Liu, W., You, L., Ou, J., & Zhang, M. (2021). Evaluation of waste cooling oil and European Rock Asphalt modified asphalt with laboratory tests and economic cost comparison. *Journal of Cleaner Production*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127364>
130. Yang, X., You, Z., Dai, Q., & Mills-Beale, J. (2014). Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources. *Construction and Building Materials*, 51, 424–431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.017>
131. Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulikakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Computers and Chemical Engineering*, 71, 538–550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>
132. Zhang, H., Bai, Y., & Cheng, F. (2018). Rheological and self-healing properties of asphalt binder containing microcapsules. *Construction and Building Materials*, 187, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.172>
133. Zhang, H. C. (2020). Self-healing property and road performance of asphalt binder and asphalt mixture containing urea-formaldehyde microcapsule. *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*, 169–196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818981-8.00009-6>
134. Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer Modification of Bitumen : Advances and Challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18–38. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>
135. Ziliute, L., Laurinavicius, A., & Vaitkus, A. (2008). The defects of asphalt pavements and their impact to driving quality in Vilnius city streets. *7th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2008 - Conference Proceedings, January*, 1247–1252.

ANEXOS

Tabela A I. Resultados do ensaio de penetração

Penetração																		
Amostras	AP			AH5			AH501			AH503			AH505			AH507		
Ensaio	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
d ₁	54	55	52	29	30	29	35	36	36	48	49	49	65	64	66	80	81	81
d ₂	54	54	53	30	29	29	36	36	36	49	49	49	66	64	64	80	82	83
d ₃	52	53	55	29	30	28	36	37	37	48	48	49	66	66	67	81	81	82
Pen(dmm)	53	54	53	29	30	29	36	36	36	48	49	49	66	65	66	80	81	82
\bar{X}	53.56			29.22			36.11			48.67			65.33			81.22		
S	0.38			0.51			0.47			0.33			0.58			0.84		

Onde: Pen – penetração; d_n- distância percorrida pela agulha; \bar{X} - média e S-desvio padrão.

Tabela A II. Resultados do ensaio de ponto de amolecimento

Ponto de amolecimento																		
Amostras	AP			AH5			AH5O1			AH5O3			AH5O5			AH5O7		
Ensaio	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A1	47	46	48	60	61	63	55	55	57	56	56	56	46	47	46	38	38	38
A2	46	46	47	61	63	63	57	56	58	57	55	57	50	45	51	39	38	39
PA (°C)	47	46	47	61	62	63	56	56	57	56	56	56	48	46	49	39	38	38
\bar{X}	46.58			61.75			56.36			56.07			47.53			38.43		
S	0.63			1.25			0.11			0.28			1.20			0.11		

Onde: PA – Ponto de amolecimento; \bar{X} - média; S-desvio padrão; T₁-temperatura de amolecimento do primeiro anel (°C) e T₂-temperatura de amolecimento do segundo anel (°C).

Tabela A III. Resultados do índice de penetração

Amostras	Ensaio	Pen (dmm)	PA (°C)	PI	\bar{X}	S
AP	1	53.3	46.5	-1.97	-1.9	0.2
	2	54.0	46.0	-2.08		
	3	53.3	47.3	-1.76		
AH5	1	29.3	60.5	-0.07	0.2	0.2
	2	29.7	61.8	0.19		
	3	28.7	63.0	0.34		
AH501	1	35.7	56.0	-0.56	-0.5	0.2
	2	36.3	55.9	-0.55		
	3	36.3	57.2	-0.27		
AH503	1	48.3	56.2	0.16	0.2	0.1
	2	48.7	55.8	0.08		
	3	49.0	56.3	0.21		
AH505	1	65.7	47.9	-1.09	-1.2	0.4
	2	64.7	46.2	-1.61		
	3	65.7	48.5	-0.93		
AH507	1	80.3	38.5	-3.61	-3.6	0.0
	2	81.3	38.4	-3.64		
	3	82.0	38.5	-3.59		

Onde: PI – índice de penetração; \bar{X} - média; S-desvio padrão

Tabela A IV. Resultados da viscosidade antes do RTFO

Viscosidade a 165°C antes do RTFO						
Amostras	AP	AH5	AH5O1	AH5O3	AH5O5	AH5O7
1	0.077	0.329	0.291	0.279	0.241	0.199
2	0.077	0.329	0.291	0.279	0.241	0.199
3	0.077	0.329	0.291	0.279	0.241	0.199
\bar{X}	0.08	0.33	0.29	0.28	0.24	0.20
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela A V. Resultados da viscosidade depois do RTFO

Viscosidade a 165°C depois do RTFO						
Amostras	AP	AH5	AH5O1	AH5O3	AH5O5	AH5O7
1	0.077	0.351	0.403	0.333	0.289	0.26
2	0.077	0.351	0.403	0.333	0.289	0.26
3	0.077	0.351	0.403	0.333	0.289	0.26
\bar{X}	0.08	0.35	0.40	0.33	0.29	0.26
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela A VI. Ductilidade antes do RTFO

Ductilidade antes RTFO 25C,cm						
Amostras	AP	AH5	AH5O1	AH5O3	AH5O5	AH5O7
1	>100	22.5	27.4	33.0	33.5	29.7
2	>100	25.8	29.0	37.5	33.5	33.7
3	>100	32.0	32.9	39.4	39.7	35.6
\bar{X}	100	27	30	37	36	33
S	0	4.82	2.83	3.29	3.58	3.01

Tabela A VII. Ductilidade depois do RTFO

Ductilidade depois RTFO 25C,cm						
Amostras	AP	AH5	AH5O1	AH5O3	AH5O5	AH5O7
1	>100	23.4	20.8	28.1	44.5	39.3
2	>100	27.8	22.2	35.3	49.8	39.4
3	>100	35.1	23.3	36.3	57.7	39.9
\bar{X}	100.00	29	22	33	51	40
S	0.00	5.91	1.25	4.47	6.64	0.32

Tabela A VIII. Ganho de massa depois do RTFO

RTFO Ganho de massa,%						
Amostras	AP	AH5	AH5O1	AH5O3	AH5O5	AH5O7
1	0.079	0.025	0.007	0.015	0.017	0.047
2	0.074	0.032	0.005	0.012	0.04	0.047
\bar{X}	0.08	0.03	0.01	0.01	0.03	0.05
S	0.004	0.005	0.001	0.002	0.016	0.000

Tabela A IX. Resultados de VAI

Amostras	V _{antes}	V _{depois}	Δ	VAI
AP	0.1	0.1	0.0	28.6
AH5	0.3	0.4	0.1	21.2
AH5O1	0.3	0.4	0.1	16.7
AH5O3	0.3	0.3	0.0	16.1
AH5O5	0.2	0.3	0.0	18.8
AH5O7	0.2	0.2	0.0	20.0

Tabela A X. Resultados de DAR

Amostras	D_{antes}	D_{depois}	Δ	DAR
AP	100.0	100.0	0.0	100.0
AH5	28.8	26.1	-2.7	90.6
AH5O1	29.8	27.6	-2.2	92.6
AH5O3	36.5	34.2	-2.3	93.7
AH5O5	39.5	36.4	-3.1	92.2
AH5O7	50.7	46.2	-4.5	91.1

Os valores de VAI foram calculados a partir das médias das viscosidades antes e depois do ensaio de envelhecimento e os valores de DAR foram calculados a partir dos resultados obtidos nos ensaios de ductilidade antes e depois do teste de envelhecimento.

V_{Antes} e D_{Antes} são viscosidade e ductilidade antes do RTFO, e V_{depois} e D_{depois} de são a viscosidade e ductilidade após RTFO respectivamente.