



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

MATEUS SILVA BRITO

**ANÁLISE DO USO DA SEIVA DA *EUPHORBIA TIRUCALLI* NA COMPOSIÇÃO DE
UMA EMULSÃO ASFÁLTICA PARA TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR
PENETRAÇÃO**

FORTALEZA

2022

MATEUS SILVA BRITO

ANÁLISE DO USO DA SEIVA DA *EUPHORBIA TIRUCALLI* NA COMPOSIÇÃO DE
UMA EMULSÃO ASFÁLTICA PARA TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR
PENETRAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

Coorientadora: Profa. Dra. Lilian Medeiros Gondim.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B876a Brito, Mateus Silva.
Análise do uso da seiva da Euphorbia Tirucalli na composição de uma emulsão asfáltica para
Tratamentos Superficiais por Penetração. / Mateus Silva Brito. – 2022.
100 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.
Coorientação: Profa. Dra. Lilian Medeiros Gondim.

1. Aveloz. 2. Bioemulsão. 3. Material alternativo. 4. Pavimentação. I. Título.

CDD 388

MATEUS SILVA BRITO

ANÁLISE DO USO DA SEIVA DA *EUPHORBIA TIRUCALLI* NA COMPOSIÇÃO DE
UMA EMULSÃO ASFÁLTICA PARA TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR
PENETRAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 26/04/2022.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Lilian Medeiros Gondim (Coorientadora)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Prof. Jorge Barbosa Soares, PhD.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Sandra de Aguiar Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. R. Christopher Williams, PhD.
Iowa State University (ISU)

Dedico esse trabalho à minha família e aos amigos que me apoiaram durante esse processo e garantiram que eu chegasse nesse momento.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio para a realização dessa pesquisa.

À Profa. Dra. Suelly Barroso, pela excelente orientação e apoio no decorrer desse trabalho. Pelos conselhos nos âmbitos, profissional, acadêmico e pessoal.

À minha coorientadora Profa. Dra. Lilian Gondim, que me acompanha desde a graduação e sempre me inspira a seguir mesmo com todas as dificuldades.

Aos membros da banca, Professores PhDs. Jorge Barbosa Soares, Christopher Williams e Dra. Sandra de Aguiar Soares pelas contribuições e disposição de participação na banca deste trabalho.

Ao Edson, Luis e Erivan da Asfaltos Nordeste pelos materiais cedidos e auxílio na elaboração das emulsões e ensaios de caracterização.

À Luciana da Britacet pelo acesso e cessão dos agregados e rochas utilizados nessa pesquisa.

À Luisa, Caíque e Giselle do Grupo Telles pela seiva de aveloz cedida para a pesquisa.

Aos membros do CT-Asfalto da Universidade Federal do Ceará. Ao Assis e ao Ricardo no Laboratório de Solos pelo auxílio nas coletas de materiais e realização de ensaios. Ao Rômulo no Laboratório de Misturas pelo auxílio nos ensaios de caracterização do agregado. Ao Wesley e ao Johnny Peter no Laboratório de Ligantes pelo auxílio nos ensaios e preparação das modificações do ligante. À Iolanda e à Annie pelos auxílios prestados durante a pesquisa. À Profa. Flávia pelo auxílio na execução e análise dos ensaios.

À Profa. Dra. Verônica Castelo Branco, ao Antônio Leal e à Raphaelle Almeida pelo auxílio na utilização do AIMS.

“Tá tudo bem. E quando não tá, é porque ainda vai ficar.”

(Luiza de Souza)

RESUMO

A aplicação de materiais de fontes renováveis na área da pavimentação, principalmente o ligante asfáltico, torna necessário o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que permitam sua substituição total ou parcial na construção de estradas mais sustentáveis. Este trabalho tem como objetivo analisar o potencial de uma bioemulsão asfáltica (ETPav) para uso em tratamentos superficiais por penetração (TSP), utilizando um bioligante parcialmente substituído por seiva de aveloz (*Euphorbia Tirucalli*). Para isso, foi desenvolvido um programa experimental, consistindo na primeira fase de extração de seiva e fabricação do bioligante e bioemulsão, além da caracterização dos ligantes e agregados utilizados, com a segunda fase consistindo na avaliação do desempenho da bioemulsão através dos ensaios de perda de agregados, exsudação e adesividade. Os resultados da primeira fase indicaram que a adição de seiva e o processo de emulsificação do ligante reduziram seu módulo complexo, além de aumentar seu ângulo de fase. Já para o *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR), a adição de seiva fez com que o biomaterial apresentasse comportamento inferior a emulsão convencional, aumentando a compliância não recuperável do bioligante. De acordo com as análises reológicas da caracterização das emulsões e analisando os dados de acordo com o *Emulsion Performance Grade* (EPG), verificou-se a adequação da bioemulsão para serviços de pavimentação em TSP nas faixas de temperatura indicadas. Os ensaios de desempenho da emulsão consistiram nos ensaios de perda de agregados, através do *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) e de adesividade agregado-ligante utilizando o *Binder Bond Strength* (BBS). O ensaio de WTAT com a ETPav mostrou uma limitação no mecanismo de ruptura da bioemulsão, fazendo-se necessário aumentar o tempo de cura em estufa. Devido ao mecanismo de cura diferenciado, o BBS foi realizado com o resíduo das emulsões, a fim de verificar a compatibilidade com o agregado. A bioemulsão obteve um resultado semelhante a emulsão convencional nesse quesito. Sendo assim, a ETPav se mostra promissora, desde que sejam realizados estudos complementares sobre seu mecanismo de ruptura, com a possibilidade de uso de aditivos, para um tempo de liberação para o tráfego compatível com a emulsão convencional.

Palavras-chave: adesividade; aveloz; bioemulsão; material alternativo; pavimentação; perda de agregados.

ABSTRACT

The application of materials from renewable sources in the paving area, mainly the asphalt binder, makes it necessary to develop innovative technologies that allow their total or partial replacement in the construction of more sustainable roads. This work aims to analyze the potential of an asphalt bioemulsion (ETPav) for use in surface treatments by penetration (TSP), partially replacing the binder by petroleum plant sap (Euphorbia Tirucalli). For this, an experimental program was developed, consisting of two phases. In the first phase, there was the sap extraction and manufacture of the biobinder and bioemulsion, in addition to the characterization of the binders and aggregates used, with the second phase consisting of the evaluation of the performance of the bioemulsion through the loss of aggregates and adhesiveness tests. The results of the first phase indicated that the addition of sap and the process of emulsification of the ligand reduced its complex modulus, in addition to increasing its phase angle. As for the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), the addition of sap led the biomaterial to have a worse performance when compared to the conventional emulsion, increasing the non-recoverable compliance of the biobinder. According to the rheological analysis of the characterization of the emulsions and analyzing the data according to the Emulsion Performance Grade (EPG), it is possible to verify the suitability of the bioemulsion for paving services in TSP in the indicated temperature ranges. The emulsion performance tests consisted of aggregate loss tests, using the Wet Track Abrasion Test (WTAT) and aggregate-binder adhesiveness using the Binder Bond Strength (BBS). The WTAT with ETPav showed a limitation in the setting mechanism of the bioemulsion, making it necessary to increase the curing time. Due to the differentiated curing mechanism, the BBS was carried out with the emulsion residue, in order to verify the compatibility with the aggregate. The bioemulsion obtained a similar result to the conventional emulsion in this regard. Therefore, ETPav shows promise, provided that further studies are carried out on its rupture mechanism, with the possibility of using additives, for a release time for traffic compatible with the conventional emulsion.

Keywords: aggregate's loss; adhesiveness; alternative material; bio-emulsion; paving; petroleum plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia para realização da revisão sistemática	6
Figura 2 – Resultados para a <i>string</i> de busca por base.....	7
Figura 3 – Quantidade de trabalhos incluídos e excluídos na seleção inicial por base	8
Figura 4 – Fluxograma das fases da revisão sistemática	9
Figura 5 – Publicações por periódico	9
Figura 6 – Quantidade de artigos por ano de publicação	10
Figura 7 – Publicações por país de origem.....	11
Figura 8 – Nuvem de palavras gerada pelo StArt.....	11
Figura 9 – Origem dos materiais	12
Figura 10 – Representação esquemática de um moinho coloidal na fabricação de emulsão asfáltica	26
Figura 11 – Critério de McLeod	30
Figura 12 – Método da bandeja	31
Figura 13 – Caixa dosadora	32
Figura 14 – Limites de resultado no BBS sugeridos por Adams.....	35
Figura 15 – Equipamento utilizado no WTAT	35
Figura 16 – Metodologia utilizada por Loiola para moldagem e ensaio em laboratório.....	36
Figura 17 – Rolo compactador e carrinho distribuidor de agregados.....	37
Figura 18 – Metodologia utilizada por Loiola para moldagem em campo	38
Figura 19 – Método de Adams (2014) de identificação da exsudação com PDI.....	39
Figura 20 – Equipamento LWT	39
Figura 21 – Uso do LWT para avaliação da exsudação em TSP.....	40
Figura 22 – Pilha de agregados na pedreira.....	42
Figura 23 – Localização e aspecto do ponto de coleta	44
Figura 24 – Aveloz e processo de coleta da seiva.....	44
Figura 25 – Aspecto da seiva de aveloz antes e após a desidratação.....	45
Figura 26 – Organograma do programa experimental.....	45
Figura 27 – Misturador de baixo cisalhamento, manta aquecedora e controlador de temperatura	46
Figura 28 – Processo de expansão durante modificação do ligante	47
Figura 29 – Moinho piloto utilizado na fabricação da ETPav.	48
Figura 30 – Partículas para análise no AIMS2	50

Figura 31 – Exemplos de imagens capturadas para o cálculo das propriedades de forma....	50
Figura 32 – Obtenção do resíduo asfáltico	51
Figura 33 – Reômetro de cisalhamento dinâmico AR-2000.....	52
Figura 34 – Processo de dosagem de agregados pelo método da bandeja	53
Figura 35 – Determinação da massa específica solta	54
Figura 36 – Manta aquecedora e rolo compactador	55
Figura 37 – Processo de confecção das amostras para ensaio WTAT	55
Figura 38 – Equipamento utilizado no ensaio BBS.....	56
Figura 39 – Espectro de FTIR das amostras de seiva de <i>Euphorbia Tirucalli</i>	58
Figura 40 – Granulometria dos agregados.....	59
Figura 41 – Distribuição das partículas quanto à angularidade.....	61
Figura 42 – Distribuição das partículas quanto à esfericidade	62
Figura 43 – Distribuição das partículas quanto à textura superficial	63
Figura 44 – Curvas mestras do módulo complexo em função da frequência.....	64
Figura 45 – Curvas mestras do ângulo de fase em função da frequência.....	65
Figura 46 – Compliância não recuperável dos resíduos de emulsões	67
Figura 47 – Amostra com RR-2C antes após o WTAT.....	70
Figura 48 – Amostra com cura incompleta no WTAT	70
Figura 49 – Resultados do ensaio de adesividade BBS.....	72
Figura 50 – Exemplo de mecanismo de falha coesiva.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definições utilizadas para o critério PICO	6
Tabela 2 – <i>String</i> de busca utilizada	7
Tabela 3 – Relação de materiais usados na composição de bioligantes	12
Tabela 4 – Taxas de aplicação do DNIT	32
Tabela 5 – Escala de classificação do TSP com base na perda de agregados.....	37
Tabela 6 – Caracterização do CAP 50/70	43
Tabela 7 – Composição da ETPav	47
Tabela 8 – Ensaio de caracterização dos agregados.....	48
Tabela 9 – Classificação dos agregados através de parâmetros obtidos do AIMS	49
Tabela 10 – Ensaio de caracterização dos ligantes	51
Tabela 11 – Atribuições das bandas do espectro de FTIR da seiva de <i>Euphorbia Tirucalli</i> ..	58
Tabela 12 – Parâmetros do PUC dos agregados	59
Tabela 13 – Resultados de caracterização dos agregados.....	60
Tabela 14 – Classificação das propriedades de forma dos agregados	60
Tabela 15 – Resultados da caracterização convencional das emulsões.....	64
Tabela 16 – Limites inferiores de temperatura do EPG.....	66
Tabela 17 – Ângulos de fase críticos para resíduos de ligantes para TSP.....	66
Tabela 18 – Limites inferiores do EPG para as emulsões estudadas.....	66
Tabela 19 – Limites do EPG para as emulsões estudadas	68
Tabela 20 – Taxas de materiais calculadas pelo método da SOP-CE.....	68
Tabela 21 – Taxas de materiais aplicadas nas amostras de TSD	69
Tabela 22 – Desgaste para as amostras com RR-2C	70
Tabela 23 – Desgaste para as amostras com ETPav	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCD	<i>Asphalt Binder Cracking Device</i>
AIMS2	<i>Aggregate Imaging Measurement System2</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
BBS	<i>Binder Bond Strength</i>
CU	Coeficiente de Uniformidade
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EPG	<i>Emulsion Performance Grade</i>
FTIR	Infravermelho por Transformada de Fourier
LWT	<i>Loaded Wheel Test</i>
MARC	<i>Modified Asphalt Research Center</i>
MAF	Mistura de Agregados Finos
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PUC	<i>Performance-Based Uniformity Coefficient</i>
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RTFO	<i>Rolling Thin Film Oven</i>
SOP-CE	Superintendência de Obras Públicas do Estado do Ceará
TGA	Análise Termogravimétrica
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSP	Tratamento Superficial por Penetração
TSS	Tratamento Superficial Simples
TST	Tratamento Superficial Triplo
TUC	Temperaturas de Usinagem e Compactação
WTAT	<i>Wet Track Abrasion Test</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Questões de pesquisa	3
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo geral	3
1.3.2	Objetivos específicos	3
1.4	Estrutura do trabalho	4
2	REVISÃO SISTEMÁTICA DO ESTADO DA ARTE EM BIOLIGANTES ...	5
2.1	Considerações Iniciais	5
2.2	Metodologia da revisão sistemática.....	5
2.3	Análise bibliométrica.....	7
2.4	Resultados da revisão de biomateriais para emprego em bioligantes.....	11
2.4.1	Principais estudos acerca de derivados animais para emprego em bioligantes	14
2.4.2	Principais estudos acerca das biomassas de pinho e carvalho para emprego em bioligantes	16
2.4.3	Principais estudos acerca do descarte de óleo de cozimento para emprego em bioligantes	18
2.4.4	Principais estudos acerca de materiais vegetais diversos para emprego em bioligantes	20
2.5	Considerações Finais	23
3	TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR PENETRAÇÃO	24
3.1	Tipos e características	24
3.2	Emulsão asfáltica	25
3.2.1	Emulsion Performance Grade (EPG).....	27
3.3	Dosagem dos Tratamentos Superficiais por Penetração	28
3.3.1	Métodos indiretos	28
3.3.2	Métodos diretos	31
3.3.3	Taxas de aplicação da SOP-CE.....	33
3.4	Defeitos em tratamentos superficiais	33
3.5	Estudos de desempenho com TSP	35
3.5.1	Perda de agregados	35
3.5.2	Exsudação	38

3.6	Considerações Finais	41
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1	Materiais	42
4.1.1	Agregado.....	42
4.1.2	Ligantes.....	42
4.1.3	Extração e processamento da seiva do aveloz	43
4.2	Programa experimental.....	45
4.3	Fase I – Caracterização dos materiais	46
4.3.1	Caracterização da seiva.....	46
4.3.2	Obtenção do bioligante	46
4.3.3	Obtenção da bioemulsão	47
4.3.4	Caracterização do agregado	48
4.3.4.1	Caracterização convencional	48
4.3.4.2	Propriedades de forma dos agregados	49
4.3.5	Caracterização das emulsões	50
4.3.5.1	Caracterização convencional	51
4.3.5.2	Caracterização reológica.....	51
4.4	Fase II – Avaliação de desempenho dos materiais em serviços de pavimentação	52
4.4.1	Ensaio de perda de agregados.....	53
4.4.2	Ensaio de adesividade.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1	Caracterização da seiva de aveloz	58
5.2	Caracterização dos agregados	59
5.2.1	Caracterização convencional	59
5.2.2	AIMS	60
5.3	Caracterização das emulsões	63
5.3.1	Caracterização convencional	63
5.3.2	Caracterização reológica.....	64
5.4	Avaliação do desempenho	68
5.4.1	Ensaio de perda de agregados.....	68
5.4.1.1	Dosagem das amostras.....	68
5.4.1.2	Desgaste das amostras com emulsão convencional.....	69
5.4.1.3	Desgaste das amostras com a ETPav	70

5.4.2	Ensaio de adesividade.....	71
6 .	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
6.1	Quanto à caracterização e coleta da seiva de aveloz	74
6.2	Quanto à caracterização dos agregados	74
6.3	Quanto à adequabilidade do uso da ETPav na área de pavimentação.....	74
6.4	Sugestões de trabalhos futuros	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Os materiais que tradicionalmente são utilizados na pavimentação vêm de fontes não renováveis e suas extrações geralmente causam impactos ambientais significativos em seus locais de origem. As questões ambientais têm sido mais discutidas desde o final do século passado, motivadas principalmente pelo crescente ritmo da expansão da população, como o aumento do consumo dos recursos naturais, necessidade de ampliação da infraestrutura urbana, geração de resíduos em maiores quantidades e o impacto gerado no planeta por todas essas atividades.

Considerando que para todo desenvolvimento, a infraestrutura de transporte é parte essencial, torna-se cada vez mais importante a busca por novos materiais de fontes renováveis ou que diminuam o impacto na natureza. Ao longo dos últimos anos foram desenvolvidas diversas pesquisas nesse sentido, sendo algumas dessas visando a substituição do ligante asfáltico, um dos materiais mais utilizados na infraestrutura de transportes. O ligante asfáltico deriva do petróleo, recurso não renovável de reservas limitadas, o que leva a um crescente aumento de seu preço (INGRASSIA *et al.*, 2019).

Nas últimas décadas, com o objetivo de se substituir os cimentos asfálticos, foram realizados estudos em busca de materiais que possuam comportamento semelhante aos ligantes asfálticos. O uso de biomassas de diversas fontes (METWALLY; WILLIAMS, 2010; PERALTA *et al.*, 2012; PERALTA *et al.*, 2013), misturas de resinas e ácidos graxos (VASCONCELOS, 2010) e até mesmo algas (AUDO *et al.*, 2012; CHAILLEUX *et al.*, 2012) são exemplos.

Gondim (2017) em sua pesquisa verificou a possibilidade de utilização da seiva de uma planta chamada de aveloz, cujo nome científico é *Euphorbia Tirucalli*, como um ligante verde na área da pavimentação. Essa pesquisadora encontrou a possibilidade de uso do bioligante da seiva do aveloz misturado ao ligante asfáltico para a imprimação betuminosa, empregando tanto o querosene quanto o D-limoneno como solvente. Para o uso em misturas asfálticas obteve que a temperatura limite a qual o material poderia ser submetido era 150°C, o que limita seu uso em misturas a quente, mas incentiva a possibilidade de uso em misturas mornas e a frio. A autora também tentou preliminarmente produzir uma emulsão asfáltica com esse material, não obtendo sucesso em função da incompatibilidade com a fase aquosa utilizada.

A limitação do uso do bioligante modificado por aveloz em temperaturas acima de 150°C levanta a questão sobre seu uso na composição de emulsões asfálticas que possam ser utilizadas em outras soluções de pavimentação como Tratamentos Superficiais por Penetração

(TSP) e microrrevestimentos asfálticos, por exemplo, que utilizam emulsões asfálticas aplicadas em temperaturas normalmente abaixo de 60°C.

Ainda não se tem muitos relatos de aplicações de bioemulsões na área da pavimentação, o que gera um campo de exploração e de pesquisa bastante vasto. Dentre as aplicações atuais tem-se Yang *et al.* (2020), que apresentaram uma bioemulsão a base de soja usada em um banho diluído para selagem de trincas e rejuvenescimento da camada asfáltica na qual foi aplicada.

Na oferta de materiais que visam diminuir o impacto ambiental das obras de pavimentação, a Emulsão Asfáltica para Imprimação (EAI) surgiu para substituir o Asfalto Diluído de Petróleo (ADP) em serviços de imprimações. A EAI representa hoje cerca de 80% do mercado de ligantes para imprimação betuminosa. Para a produção do ADP usam-se substâncias diluentes como o querosene que geram emissões de substâncias tóxicas durante sua aplicação. Outra opção seria substituir o solvente, utilizando o D-limoneno, derivado das cascas de frutas cítricas, em vez do querosene, como demonstrado por Gondim (2017) e Almeida (2017).

Sendo assim, vê-se necessário o desenvolvimento de pesquisas focando em biomateriais e suas novas aplicações em pavimentação. Essa pesquisa tem então a finalidade de contribuir nessa área, de modo a verificar a aplicabilidade de um bioligante na formulação de uma emulsão asfáltica, denominada ETPav, para uso em TSP. A inspiração para o nome vem da própria planta estudada, sendo “ET” referente à *Euphorbia Tirucalli*, e o “Pav” à sua aplicação em pavimentação.

1.1 Justificativa

A construção e a manutenção de rodovias tendem cada vez mais a procurar soluções ecologicamente menos danosas, utilizando-se de materiais que visam substituir o ligante asfáltico, total ou parcialmente, de modo que o impacto ambiental em termos de pegada de carbono seja reduzido (INGRASSIA *et al.*, 2019). Além do impacto ambiental, visa-se essa substituição também devido a possível limitação da quantidade de petróleo, o que faz com que o ligante asfáltico possa ficar mais escasso com o passar dos anos.

Enquanto nos últimos anos o desenvolvimento de novos bioligantes vem se desenvolvendo de forma acelerada, as suas aplicações em outros tipos de revestimentos, como bioemulsões para tratamentos superficiais, ainda são incipientes. Os tratamentos superficiais são utilizados, no Brasil, principalmente em rodovias de baixo volume de tráfego. Considerando

a alta taxa de rodovias não pavimentadas no país (CNT, 2021), de 78,5%, o desenvolvimento de materiais ambientalmente mais “verdes” se torna uma necessidade nos próximos anos.

O trabalho de Gondim (2017) visou a investigação de um bioligante composto com a seiva do aveloz, planta que tem crescimento adequado em regiões áridas como o nordeste brasileiro. Os resultados obtidos pela autora indicaram a possibilidade de uso do bioligante em aplicações de tratamentos superficiais. A autora buscou produzir uma bioemulsão, não obtendo sucesso devido a incompatibilidade da fase aquosa utilizada.

Sendo assim, este trabalho busca a obtenção de uma bioemulsão a base da seiva do aveloz para uso em tratamentos superficiais por penetração. O estudo se faz necessário em um momento em que se buscam materiais alternativos para a substituição do ligante asfáltico de petróleo que conservem suas características e ao mesmo tempo sejam ecologicamente, tecnicamente e financeiramente viáveis.

1.2 Questões de pesquisa

- a) A emulsão ETPav desenvolvida manteria as propriedades do ligante utilizado para sua fabricação?
- b) A emulsão ETPav atenderia aos requisitos de caracterização vigentes?
- c) Como seria o comportamento da emulsão ETPav em relação aos agregados pétreos?
- d) Como a emulsão ETPav se comportaria em revestimentos asfálticos do tipo TSP?
- e) A emulsão ETPav desenvolvida seria técnica e financeiramente viável para uso em TSP?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar a viabilidade do uso da seiva da *Euphorbia Tirucalli* na composição de uma emulsão asfáltica, ETPav, para uso em tratamentos superficiais por penetração.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, traçaram-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Fabricar uma emulsão asfáltica, denominada ETPav, à base do bioligante de *Euphorbia Tirucalli*.
- b) Avaliar o potencial de uso do bioligante em tratamentos superficiais por meio da caracterização convencional e reológica segundo o protocolo Emulsion Performance Grade (EPG).
- c) Avaliar o comportamento da emulsão ETPav, quanto à adesividade, com os agregados convencionalmente empregados em tratamentos superficiais utilizando o ensaio Binder Bond Strength (BBS).
- d) Avaliar o comportamento da emulsão ETPav, quanto à perda de agregados, utilizando o ensaio de Wet Track Abrasion Test (WTAT).
- e) Realizar a comparação técnica entre a emulsão asfáltica tradicional e a ETPav.

1.4 Estrutura do trabalho

Esse documento é composto de 5 capítulos, descritos a seguir:

No presente capítulo tem-se a introdução do trabalho, onde são apresentados a justificativa, o problema, as questões de pesquisa, bem como os objetivos geral e específicos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão sistemática acerca dos bioligantes, cujo objetivo foi apresentar o estado da arte no assunto e a evolução das pesquisas ao longo dos anos.

O capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica sobre Tratamentos Superficiais por Penetração, seus conceitos, processo de dosagem, principais defeitos e ensaios de avaliação de desempenho dos TSP e materiais utilizados.

O capítulo 4 apresenta o processo de coleta da seiva da *Euphorbia Tirucalli*, assim como seu processamento para a elaboração da emulsão asfáltica ETPav. Consta nesse capítulo ainda informações sobre os outros materiais empregados, o programa experimental e detalhes sobre os ensaios realizados.

O capítulo 5 apresenta os resultados dos ensaios realizados, assim como suas análises, relatando o comportamento das amostras nas condições estudadas.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações com base nos resultados obtidos e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DO ESTADO DA ARTE EM BIOLIGANTES

2.1 Considerações Iniciais

Um bioligante é um material de origem vegetal ou animal que pode ser utilizado em substituição parcial ou total do ligante asfáltico convencional, derivado do petróleo. Ingrassia *et al.* (2019) definem que o bioligante, de maneira genérica, é um material obtido da mistura do ligante asfáltico com um material renovável de origem orgânica, tornando os pavimentos mais sustentáveis.

Os materiais utilizados em bioligantes devem apresentar características básicas. Primeiramente, não podem gerar riscos adicionais de saúde ou segurança aos trabalhadores envolvidos. A mistura contendo bioligante deve ser reciclável no fim da vida de serviço, visto que o setor de pavimentação vem promovendo a reciclagem de materiais nos últimos anos. E finalmente, deve ser um material pelo menos competitivo técnica e economicamente quando comparado aos materiais tradicionais (INGRASSIA *et al.*, 2019).

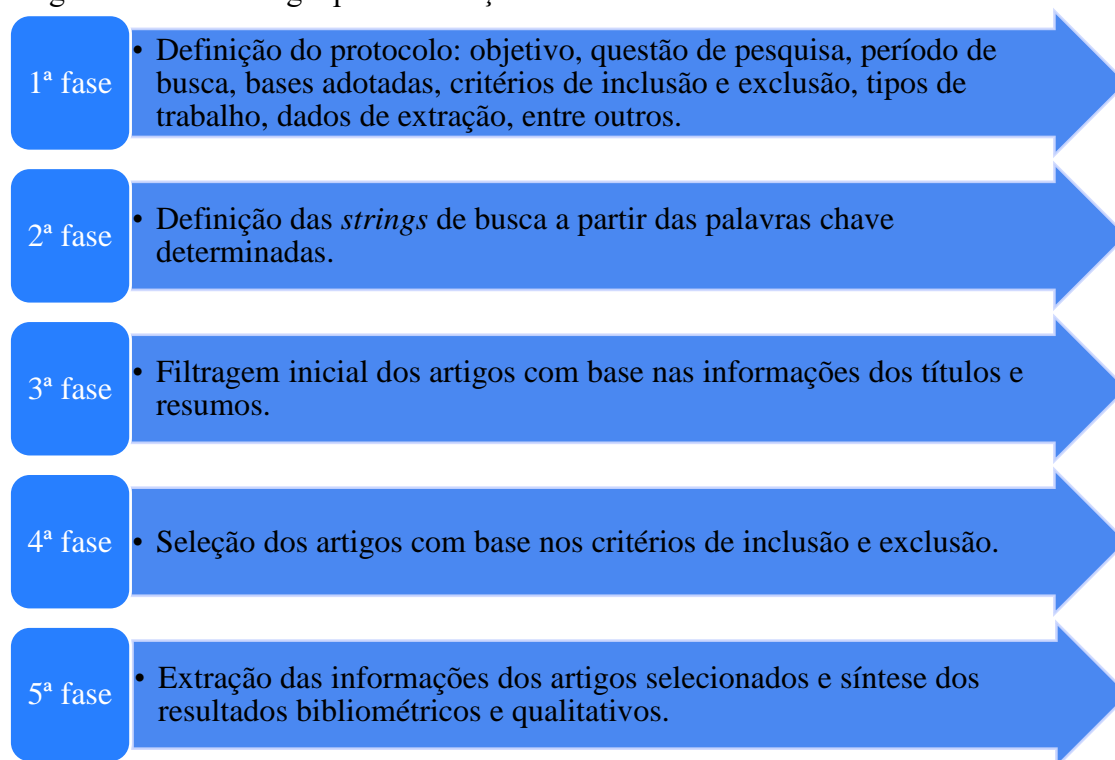
Segundo Mohamed Metwally e Williams (2010), os bioligantes podem ser utilizados de três diferentes formas para reduzir a demanda por ligante betuminoso: a) como um ligante alternativo direto, substituindo 100% do ligante asfáltico; b) como um extensor, substituindo de 25 a 75%; ou então c) como um modificante quando substituí até 10%.

Este capítulo apresenta uma revisão sistemática realizada a fim de se explorar o estado da arte quanto às questões dos bioligantes. São explorados os tipos de materiais utilizados, o tipo de modificação, quantidade e efeitos da aplicação de biomateriais em ligantes asfálticos.

2.2 Metodologia da revisão sistemática

As fases metodológicas empregadas na revisão são apresentadas na Figura 1. Para auxiliar na organização da seleção e dos resultados obtidos foi utilizado o *software* StArt (*State of Art through Systematic Review*), desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (Lapes) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O programa apresenta todas as etapas da revisão, desde a definição do protocolo, processo de seleção inicial com disposição dos títulos, palavras chaves e resumos, além de funcionalidades que auxiliam no processo de extração das informações.

Figura 1 – Metodologia para realização da revisão sistemática



Fonte: Elaborada pelo autor.

O protocolo da revisão foi fundamentado na delimitação da questão principal de pesquisa e na definição dos valores utilizados pelo critério PICO (*Population, Intervention, Control, Outcomes*), conforme Tabela 1. A questão de pesquisa estabelecida para a revisão sistemática foi: quais os materiais utilizados na obtenção de bioligantes e quais suas aplicações na pavimentação?

Tabela 1 – Definições utilizadas para o critério PICO

Critério PICO	Definição
População (<i>population</i>)	Trabalhos sobre obtenção, caracterização e aplicação de bioligantes.
Intervenção (<i>intervention</i>)	Materiais de origem animal ou vegetal utilizados com objetivo de modificar ou substituir total ou parcialmente ligantes asfálticos na pavimentação.
Literatura de controle (<i>control</i>)	Ingrassia <i>et al.</i> (2019)
Resultados (<i>outcomes</i>)	Resultados de aplicação de biomateriais na pavimentação com a intenção de substituir total ou parcialmente o ligante asfáltico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A etapa de identificação dos trabalhos ocorreu em junho de 2021, nas bases de dados *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*, selecionadas devido suas abrangências e

relevâncias para o tema de estudo. A fim de contemplar o histórico de estudo sobre biomateriais aplicados à pavimentação, não se limitou o período de buscas. Decidiu-se limitar os resultados para apenas artigos científicos publicados em periódicos, excluindo assim os artigos publicados em congressos e conferências e outros artigos de revisão. Os artigos de congressos e conferências corresponderiam a um acréscimo de aproximadamente 25% no total de trabalhos.

A partir da literatura de controle e dos sinônimos dos termos foram definidas as seguintes palavras-chave para o estudo: *bio asphalt*, *bio binder*, *bio bitumen*, *bio modified asphalt*, *bio oil*, *pavement*, *asphalt*, *binder* e *bitumen*. Foram ainda adotadas variações das palavras com o prefixo *bio*, adotando a utilização do hífen, devido a variação no modo de escrita encontrados nos trabalhos. Com base nas palavras-chave obtidas e no uso de operadores booleanos foi determinada a *string* de busca a ser inserida nas bases de dados escolhidas, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – *String* de busca utilizada

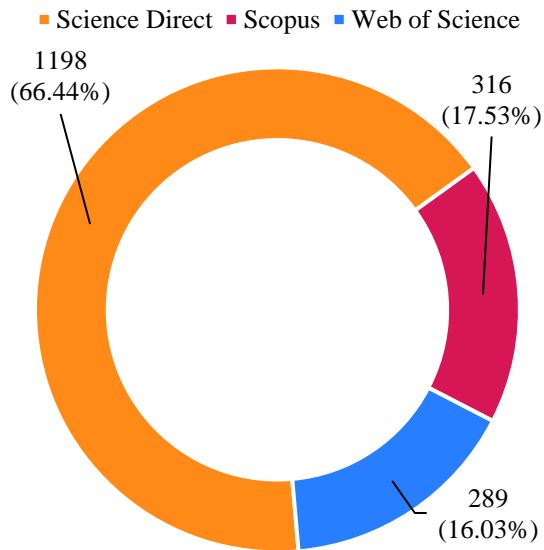
(“*bio asphalt*” OR “*bio binder*” OR “*bio bitumen*” OR “*bio modified asphalt*” OR “*bio oil*”
 OR “*bio-asphalt*” OR “*bio-binder*” OR “*bio-bitumen*” OR “*bio-modified asphalt*” OR “*bio-*
oil” OR “*bioasphalt*”) AND (“*pavement*” OR “*asphalt*” OR “*binder*” OR “*bitumen*”)

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 Análise bibliométrica

A Figura 2 apresenta os resultados do levantamento inicial distribuídos pelas bases utilizadas. Ao todo foram encontrados 1.803 trabalhos. A base com maior retorno foi a *Science Direct*, com 1.198 artigos, correspondendo a 66,44% do total. *Scopus* e *Web of Science* obtiveram resultados semelhantes, 16,03% e 17,53%, respectivamente.

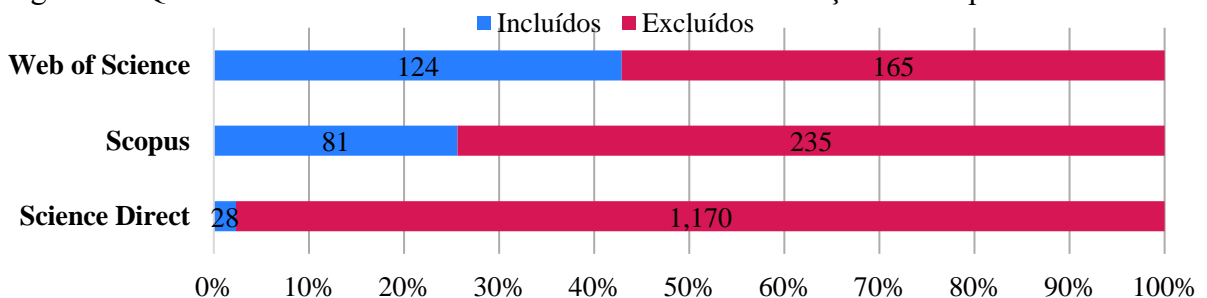
Figura 2 – Resultados para a *string* de busca por base



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na seleção inicial foram excluídos 1.570 trabalhos, sendo 358 desses trabalhos duplicados. O principal critério de exclusão nessa fase foi a presença de palavras-chaves ou informações não condizentes com o objetivo da revisão. A Figura 3 apresenta as quantidades de trabalhos incluídos e excluídos na seleção inicial. A base de dados *Science Direct*, apesar de apresentar o maior número de trabalhos, obteve apenas 28 artigos selecionados para a fase de extração. Os trabalhos dessa base em sua maioria não eram relacionados com a área de pavimentação e modificação de ligantes asfálticos. Foram selecionados trabalhos apenas que envolvessem o uso de bioligantes como substituintes do ligante asfáltico, sendo excluídos aqueles trabalhos que usavam biomateriais como rejuvenescedor.

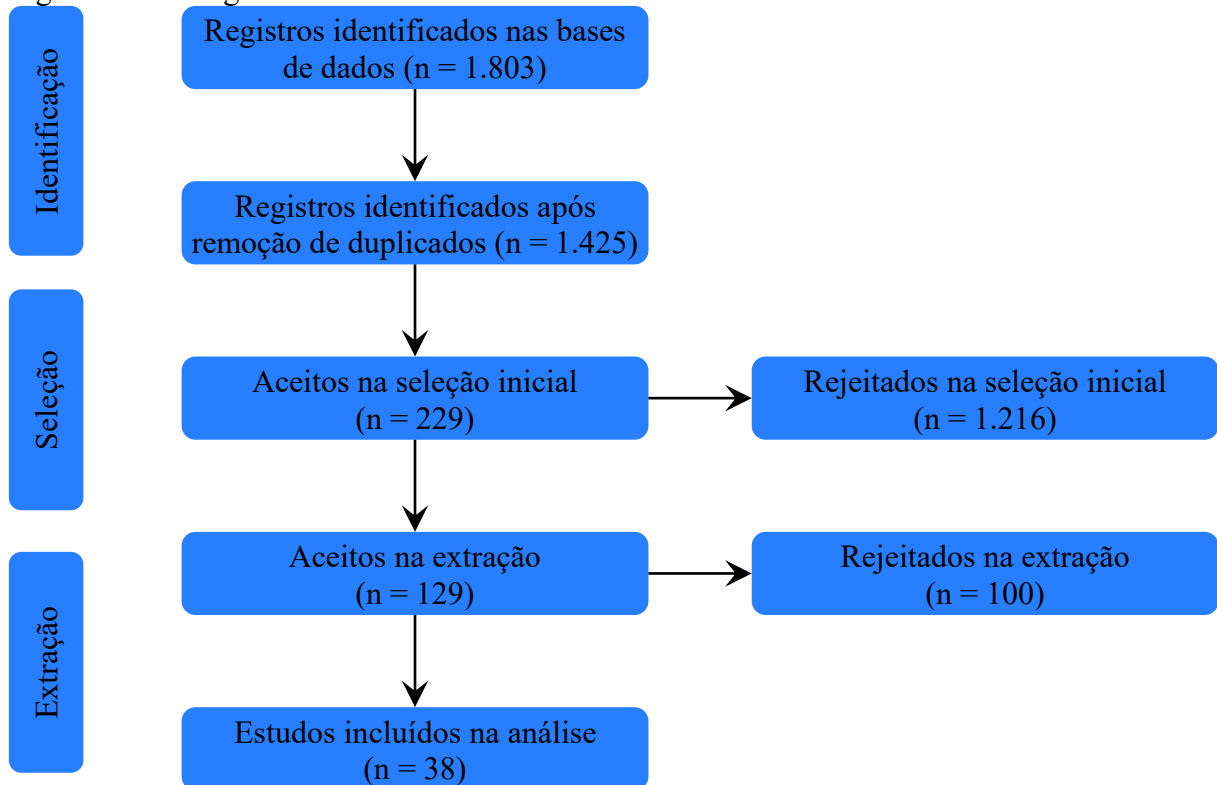
Figura 3 – Quantidade de trabalhos incluídos e excluídos na seleção inicial por base



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 4 apresenta o fluxograma das fases de revisão para melhor visualização. Os 100 artigos rejeitados na fase de extração foram excluídos devido: (i) não serem relacionados com a área de pavimentação (26); (ii) não descreverem o material utilizado (48) ou (iii) não descreveram o processo de obtenção do bioligante (26).

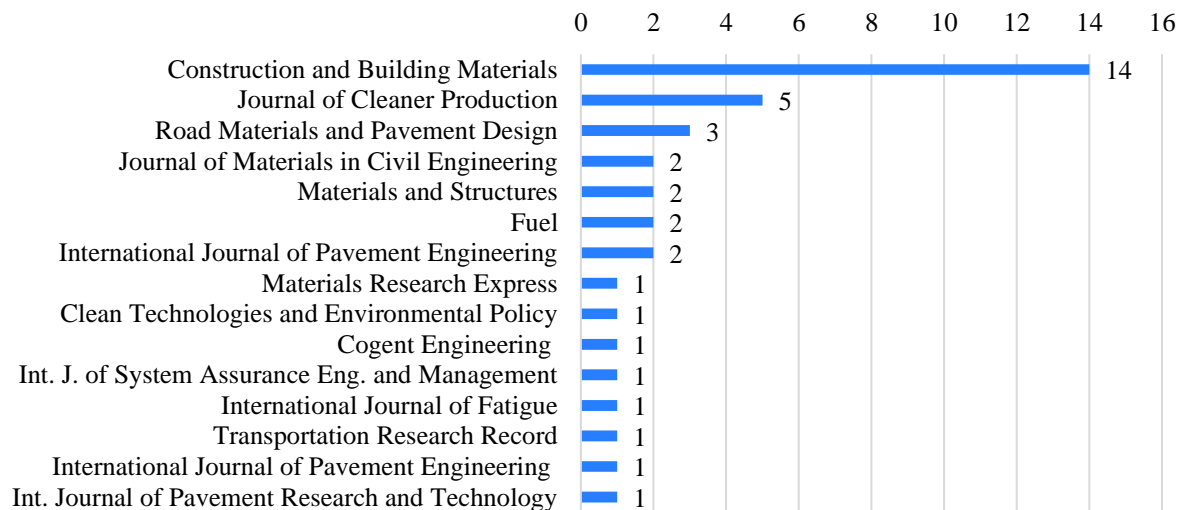
Figura 4 – Fluxograma das fases da revisão sistemática



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os trabalhos aceitos na etapa de extração foram separados por periódico e ano de publicação. A Figura 5 apresenta a quantidade de artigos por revista, onde a *Construction and Building Materials* apresentou a maior quantidade de publicações, representando mais de 1/3 do total de artigos selecionados.

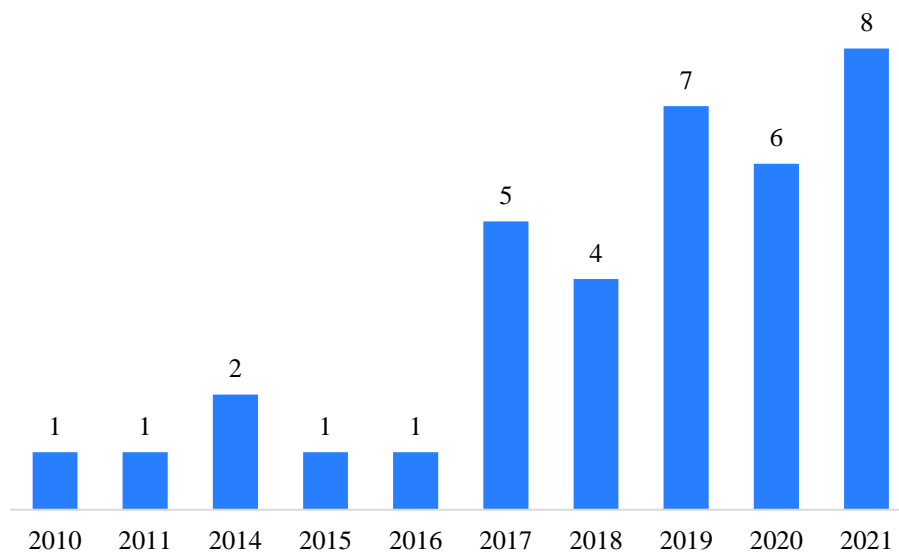
Figura 5 – Publicações por periódico



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 6 apresenta a divisão de publicações por ano, onde se verifica o crescimento nos últimos anos em publicações de biomateriais para substituição total ou parcial dos ligantes asfálticos. O período de 2017-2021 apresentou 5 vezes mais publicações que o período de 2010-2016. Não foram encontradas publicações nos anos de 2012 e 2013 na seleção de acordo com os parâmetros estabelecidos.

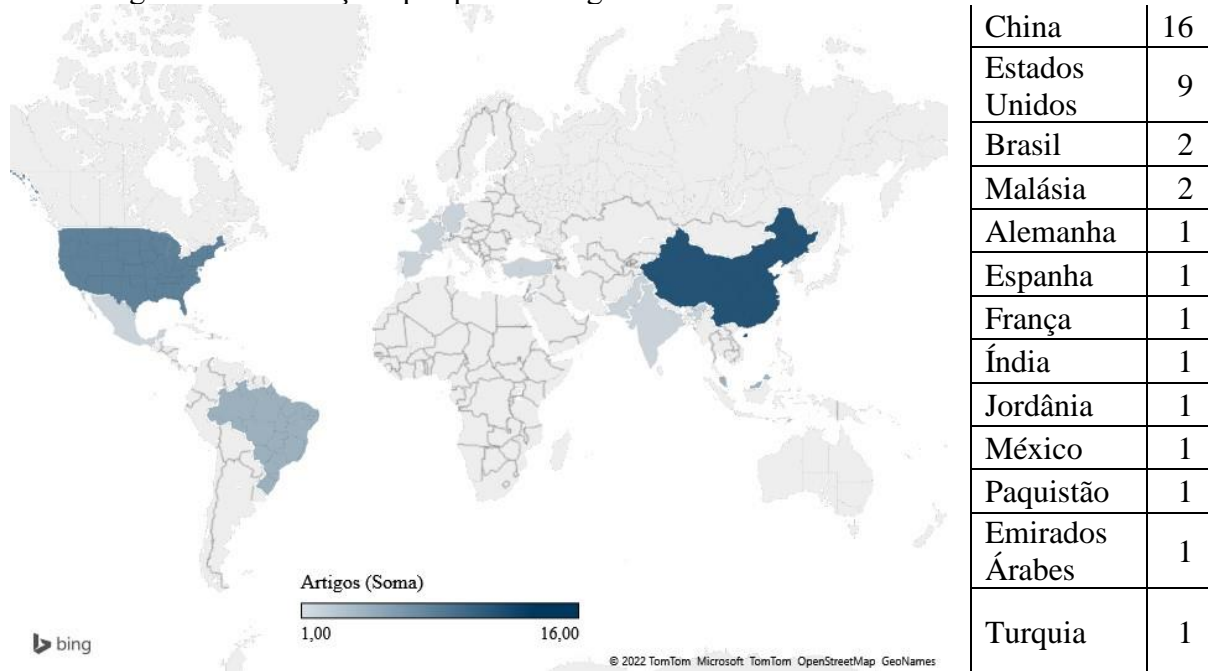
Figura 6 – Quantidade de artigos por ano de publicação



Fonte: Elaborada pelo autor.

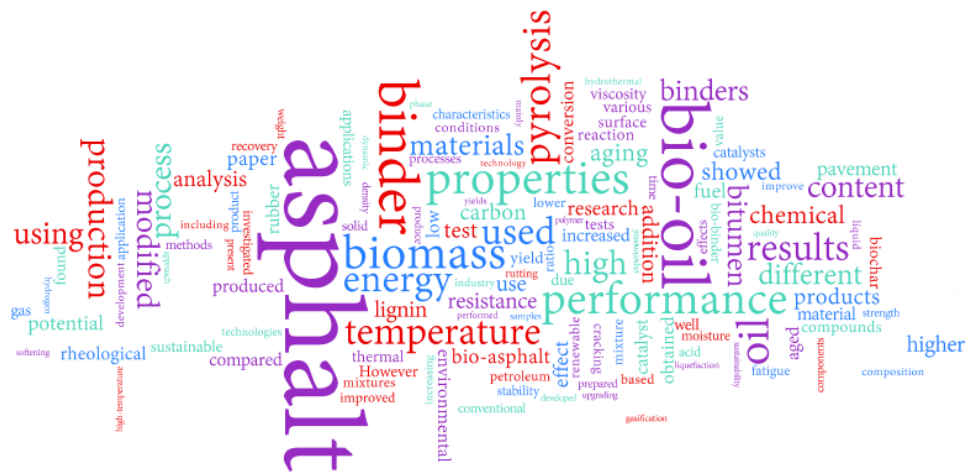
A Figura 7 apresenta a divisão de publicações por país de origem, onde claramente verifica-se o domínio das pesquisas em bioligantes na China (16) e Estados Unidos da América (9) representando 2/3 das publicações totais. O restante das publicações divide-se de forma uniforme entre países da América Latina, Europa e Ásia. A partir das palavras contidas nos resumos dos artigos selecionados, foi gerada a nuvem de palavras apresentada na Figura 8. Verifica-se, além das palavras usadas nas *strings*, palavras relacionadas com as propriedades e desempenho dos materiais.

Figura 7 – Publicações por país de origem



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Nuvem de palavras gerada pelo StArt



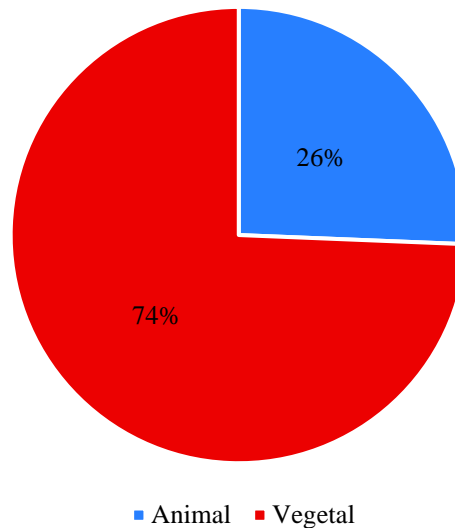
Fonte: Elaborada pelo autor.

2.4 Resultados da revisão de biomateriais para emprego em bioligantes

Foi verificada a origem dos biomateriais utilizados na composição dos bioligantes. O resultado pode ser encontrado na Figura 9. A maior parte dos materiais estudados são de origem vegetal de diversas fontes (29) enquanto os de origem animal (10) são em sua maioria dejetos. O número de origem é superior ao de trabalhos devido ao fato de um dos trabalhos usar sobras de alimentos contendo material de origem animal e vegetal. Os materiais estudados

podem ser encontrados na Tabela 3. Os materiais mais estudados para a substituição total ou parcial do ligante asfáltico são os dejetos suínos, com 8 trabalhos e o descarte de óleo de cozimento, com 11 trabalhos.

Figura 9 – Origem dos materiais



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Relação de materiais usados na composição de bioligantes

Material	Teor	Publicação
	2, 5 e 10%	You <i>et al.</i> (2011)
	5%	Mills-Beale <i>et al.</i> (2014)
	5%	Mogawer <i>et al.</i> (2015)
Dejetos suínos	15%	Fini <i>et al.</i> (2017)
	10%	Samieadel, Schimmel e Fini (2018)
	5 % e 10%	Liu <i>et al.</i> (2020)
	5% e 10%	Oldham e Fini (2020)
	15%	Wang <i>et al.</i> (2021)
Casca de lagostim	5%, 10% e 20%	Lv <i>et al.</i> (2020)
Resíduos de arroz, vegetais e frango cozidos	10%, 20% e 30%	Mahssin <i>et al.</i> (2021)
Alga marinha (Sargassum)	0,50%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5%, 3%, 3,5% e 4%	Salazar-Cruz <i>et al.</i> (2021)
Pinho	100%	Espinosa <i>et al.</i> (2021)

	35%	Barzegari e Solaimanian (2020)
	5%, 10%, 15% e 20%	He <i>et al.</i> (2019)
	100%	Manke <i>et al.</i> (2021)
Carvalho	100%	Raouf e Williams (2010)
	4%, 8%, 12% e 16%	Sun <i>et al.</i> (2019)
	1%, 3% e 5%	Cao e Wang (2019)
	33,3%	Sun <i>et al.</i> (2017a)
	2,5%, 5%, 7,5% e 10%	Niu <i>et al.</i> (2021)
	3%, 6% e 9%	Ma <i>et al.</i> (2020)
Descarte de óleo de cozimento	1%, 2%, 4%, 6% e 8%	Al-Omari <i>et al.</i> (2017)
	1%, 3% e 5%	Cao, Wang e Wang (2019)
	1%, 3% e 5%	Wang, Chie e Cao (2019)
	33,3%	Sun <i>et al.</i> (2017b)
	5%	Luo, Zhang e Cong (2017)
	10%, 12%, 15%, 18% e 20%	Dong <i>et al.</i> (2019)
Caule e folhas do milho	5%, 10% e 15%	Lei <i>et al.</i> (2018a)
	15%	Lei <i>et al.</i> (2018b)
Óleo da semente de palma	20%, 40% e 60%	Alamawi <i>et al.</i> (2019)
Resíduos da produção da castanha de caju	10% e 20%	Uchoa <i>et al.</i> (2021)
Bagaço de cana de açúcar	5% e 10%	Ahmad <i>et al.</i> (2021)
Semente de <i>Mesua Ferrea</i>	5%, 10%, 15% e 20%	Kumar <i>et al.</i> (2018)
Polpa de rosas	2% e 4%	Terzi <i>et al.</i> (2020)
	2%	Cuadri et al (2014)
Óleo de mamona	5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%	Zeng et al (2016)
	8,8%, 17,5%, 26,2% e 35%	Yan <i>et al.</i> (2020)

Fonte:..Elaborada pelo autor.

O trabalho mais antigo entre os selecionados é o estudo de Raouf e Williams (2010) que buscaram substituir totalmente o ligante asfáltico por um bio-óleo feito de carvalho. Foram encontrados variados materiais utilizados, porém nota-se que os derivados vegetais são mais proeminentes nos materiais estudados. Os materiais com mais trabalhos são os dejetos suínos e o descarte de óleo de cozimento.

2.4.1 Principais estudos acerca de derivados animais para emprego em bioligantes

Os estudos com dejetos suínos mais antigos dessa revisão são os de You *et al.* (2011), que era voltado para misturas mornas. Foram realizados ensaios de desempenho em baixa temperatura, o *Bending Beam Rheometer* (BBR) e o *Asphalt Binder Cracking Device* (ABCD), verificando-se que, conforme o teor desse biomaterial aumenta, a temperatura de trincamento diminui. Essa tendência foi apresentada nos 2 ensaios. Para o maior teor foi observada uma redução entre 4,6 e 4,9 °C.

Mills-Beale *et al.* (2014) estudaram o comportamento do bioligante com dejetos suínos quanto ao envelhecimento. Verificou-se que esse bioligante obteve menores viscosidades, em uma média de 27,6% para o ligante não envelhecido e 28,9% para o ligante envelhecido no ensaio de estufa de filme fino rotativo (*Rolling Thin Film Oven – RTFO*). Esse biomaterial alterou as propriedades de deformação permanente do ligante puro, fazendo com que a temperatura superior do grau de desempenho (*performance grade – PG*), do bioligante fosse de 70°C, enquanto a do ligante puro era 64°C. Houve uma redução no ângulo de fase, deixando o ligante mais elástico. O ensaio de BBR mostrou melhora na resistência às trincas térmicas. O ensaio de Espectrometria da Região de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) mostrou que os grupos funcionais ficaram inalterados e através da redução dos índices moleculares de carbonilas e sulfóxidos que os dejetos suínos reduziram a rigidez do ligante.

Mogawer *et al.* (2016) estudaram o bioligante com dejetos suínos aplicado a misturas com alto teor de asfalto reciclado (*Reclaimed Asphalt Pavement – RAP*). A baixa viscosidade desse bioligante fez com que a mistura de controle (sem RAP) obtivesse menor volume de vazios. O uso desse bioligante pode causar a redução da rigidez que ocorre pela alta taxa de RAP usada. Esse bioligante melhorou o comportamento da mistura com RAP quanto ao trincamento por fadiga. A mistura desse bioligante e RAP se comportou de forma inferior comparada com a mistura de controle quanto à susceptibilidade à umidade e deformação permanente, reduzindo a temperatura de desempenho superior em 3°C. Houve melhora na trabalhabilidade e o recobrimento das partículas foi de quase 100% com esse bioligante, mesmo

com temperaturas inferiores. Em geral, houve um bom grau de combinação entre esse bioligante e o ligante do RAP, porém de modo inferior quando comparado ao ligante virgem, o que os autores atribuíram as menores temperaturas de usinagem e compactação.

Fini *et al.* (2017) introduziram o bioligante com bio-óleo derivado dos dejetos suínos em um asfalto borracha. A viscosidade rotacional mostrou que esse bio-óleo diminui a viscosidade do material, levando a menores temperaturas de usinagem e compactação (TUC). Houve uma redução na separação de fase de acordo com o ensaio realizado, chamado *Cigar Tube Separation Test*. Esse bioligante quando adicionado com a borracha apresentou resultados superiores no critério de alta temperatura do que o ligante puro, porém inferiores ao asfalto borracha. Quanto ao critério de fadiga do *Superpave*, o ligante puro e o asfalto borracha apresentaram comportamentos semelhantes e o bioligante se mostrou melhor que os dois. A compliância não-recuperável obtida no MSCR do bioligante foi maior que o do asfalto borracha. O BBR indicou comportamento mais dúctil. Em termos de mistura foi analisado em nível de Mistura de Agregados Finos (MAF). Enquanto o asfalto borracha apresentou a maior rigidez em altas temperaturas, a utilização desse bioligante melhorou consideravelmente as propriedades de baixas temperaturas ao mesmo tempo que obteve resultados aceitáveis nas altas.

Samieadel, Schimmel e Fini (2018) calcularam o custo de vida do bioligante com dejetos suínos, quando comparado com o ligante convencional. Foi calculada a energia gasta na obtenção desse biomaterial e nos processos de usinagem e compactação, uma vez que a viscosidade diminui com uso desse bioligante. Também foram calculadas as emissões de gases para a atmosfera durante o processo de produção e preparação dos materiais. Verificou-se ainda o impacto do uso dos dejetos suínos comparando com as emissões que ocorreriam caso ficasse exposto. O bioligante gerado da adição dos dejetos suínos gerou economia de energia usada no processo e as energias de usinagem e compactação foram reduzidas em mais de 50%. O ligante comum emite mais de 5 vezes mais CO₂ e 3 vezes mais metano. O uso do dejetos suíno implica numa redução de impacto ambiental de 80% quando comparado ao ligante asfáltico puro.

Liu *et al.* (2020) fizeram uma análise de viabilidade técnica do bioligante com dejetos suíno. Os autores chamam a atenção para o fato de ser preciso analisar o envelhecimento térmico desse bioligante devido a presença de componentes leves que podem ser facilmente oxidados. Esse bioligante apresentou uma melhora de comportamento em baixas temperaturas e susceptibilidade térmica semelhante ao ligante puro.

Oldham e Fini (2020) realizaram ensaios a nível de ligante com os teores de 5% e 10% do bio-óleo de dejetos suínos e a nível de mistura com o teor de 5%. Os resultados de MSCR indicam uma maior susceptibilidade à deformação permanente quanto maior o teor de

bioligante utilizado. Quanto ao dano por umidade, os resultados do *Hamburg Wheel Test* indicaram que a presença do bioligante pode melhorar significativamente a resistência do ligante asfáltico ao dano coesivo por umidade induzida (dano que ocorre na própria estrutura do ligante e não na interface com o agregado). No ensaio de adesão direta a carga para a falha após o condicionamento foi aproximadamente 38% maior para os dois teores, quando comparada com o ligante de controle. Quanto ao ângulo de contato, verificou-se uma queda significativa dos ângulos do bioligante quando comparados com o ligante, após o condicionamento saturado. A nível de mistura, o dano por umidade induzida avaliado pela Resistência à Tração Retida apresentou melhor resultado quando comparado com a mistura que utilizou ligante puro, corroborando os resultados obtidos a nível de ligante.

Wang *et al.* (2021) testaram o uso do bioligante a base de um bio-óleo obtido de dejetos suínos em asfalto borracha, onde a adição do bio-óleo resultou numa piora no desempenho à fadiga e trincamento térmico em baixas temperaturas, quando comparado ao ligante puro com borracha. A adição da borracha diminuiu os efeitos adversos causados pelo bio-óleo no desempenho em altas temperaturas.

Lv *et al.* (2020) estudaram a casca de lagostim nos teores de 5, 10 e 20%. A casca do lagostim foi moída e adicionada ao ligante. O estudo focou nas características de alta temperatura do bioligante. Os ensaios de penetração e ponto de amolecimento identificaram um aumento na rigidez desse bioligante, se comparado com o ligante convencional. Esse resultado foi corroborado no DSR, onde se observou que nos ligantes modificados houve um aumento de rigidez e diminuição do ângulo de fase, o que gerou um aumento no fator correspondente a deformação permanente. O ensaio de MSCR apresentou resultados que indicaram uma maior resistência a deformação no ligante com adição desse biomaterial. O ensaio de FTIR não identificou alterações químicas no bioligante, indicando que o processo de modificação foi inteiramente físico.

2.4.2 Principais estudos acerca das biomassas de pinho e carvalho para emprego em bioligantes

Raouf e Williams (2010) estudaram o uso da biomassa do carvalho na composição de um bio-óleo a fim de substituir o ligante asfáltico em sua totalidade. O material foi testado puro e com a adição de 3 polímeros, em dois teores. Esse bioligante se mostrou mais suscetível as temperaturas que os ligantes convencionais. Os intervalos de temperatura nos quais é notada a susceptibilidade térmica desse bioligante foram bem inferiores ao dos ligantes virgens,

melhorando seu desempenho com adição de polímeros. A viscosidade variava com maior influência da temperatura do que do cisalhamento.

Espinosa *et al.* (2021) estudaram o uso da biomassa de pinho na composição de um bioligante que substituísse totalmente o ligante asfáltico. A rigidez e a deformação permanente desse bioligante foram compatíveis com o ligante asfáltico, porém seu desempenho quanto à fadiga foi inferior. Esse bioligante não pôde ser classificado quanto ao PG, uma vez que o envelhecimento na câmara de envelhecimento sob pressão (*Pressure Aging Vessel* – PAV) gerou degradação na estrutura do biomaterial. Os ensaios térmicos de análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) mostraram que o ligante asfáltico apresenta estabilidade em uma faixa de temperatura maior que o bioligante estudado, porém o bioligante se mostrou tão estável quanto o ligante virgem nas TUC.

He *et al.* (2019) estudaram bioligantes a partir do uso de diferentes bio-óleos, obtidos a partir de pinho, salgueiro e choupo, com teores de 5% a 20%. A estabilidade térmica e a estocagem foram mantidas para os teores estudados. Todos os materiais desse estudo apresentaram melhora no desempenho em altas temperaturas enquanto pioraram nas baixas temperaturas. O derivado de pinho foi o que mais causou alterações positivas e negativas nos critérios de desempenho do *Superpave*, enquanto o derivado do choupo foi o que causou menores alterações no ligante base.

Barzegari e Solaimanian (2020) estudaram bioligantes a base de *switchgrass*, um tipo de grama nativa da América do Norte, e pinho. Os bioligantes apresentaram comportamentos semelhantes ao ligante puro nas fases sem envelhecimento e com envelhecimento a curto prazo, porém o desempenho ficou comprometido no envelhecimento a longo prazo, demonstrando comportamento inferior em baixas temperaturas. Os bioligantes apresentaram melhor resistência à deformação permanente, porém comportamento inferior quanto à fadiga.

Manke *et al.* (2021) estudaram o uso da seiva de pinho modificada por um polímero em substituição total do ligante asfáltico. Foi avaliada a substituição completa do ligante por bioligante em uma mistura contendo 50% de RAP. Devido às características de viscosidade do bioligante não foi possível verificar seu PG. Verificou-se porém que o bioligante quando misturado ao ligante extraído do RAP apresentou PG 58-22. O bioligante fez com que a resistência ao trincamento térmico aumentasse quando comparado ao ligante virgem. Quando analisadas as misturas asfálticas, em testes utilizando uma viga para análise da fadiga em temperaturas intermediárias, as misturas com bioligante se comportou de forma inferior que o ligante virgem, mas ainda dentro dos limites aceitáveis para trincamento por fadiga. Verificou-

se que em altas temperaturas a mistura com o bioligante apresentou maior *Flow Number* que o ligante virgem, mas ainda dentro dos limites. Quanto à resistência ao dano por umidade, estatisticamente a mistura com esse bioligante obteve valores semelhantes a mistura com ligante virgem. No geral, se mostrou viável usar o bioligante em misturas com 50% RAP.

2.4.3 Principais estudos acerca do descarte de óleo de cozimento para emprego em bioligantes

Sun *et al.* (2017a) estudaram um bioligante que foi obtido a partir de uma mistura do bio-óleo obtido do descarte de cozimento, em um teor de 33,3% com partículas sólidas de asfalto, resina e polímeros. Ensaio no DSR mostraram que esse bioligante tem desempenho superior em altas temperaturas ao ligante convencional e semelhante a um ligante modificado com polímero. Em baixas temperaturas esse bioligante se mostrou melhor que os outros dois. Por fim, o *frequency sweep* e o FTIR mostram que esse biomaterial tem uma susceptibilidade ao envelhecimento menor que o ligante convencional. Sun *et al.* (2017b), testando o mesmo material, encontraram desempenho em alta temperatura semelhante a ligante modificado por polímero e superior ao ligante puro, assim como nos ensaios de deformação permanente e resistência à umidade. O desempenho quanto a fadiga também foi superior ao ligante comum, mas inferior ao modificado por polímero.

Al-Omari *et al.* (2017) estudaram o uso do óleo de cozimento descartado em teores de 1% a 8%. Esse bioligante aumentou a ductibilidade e reduziu o ponto de fulgor. Também aumentou a fluidez e reduziu a viscosidade, melhorando a trabalhabilidade em temperaturas mais baixas, o que gera economia de energia na produção. Melhorou o desempenho do ligante em baixas temperaturas, fazendo com o que o mesmo possa ser utilizado em temperaturas mais baixas. Por outro lado, a adição do biomaterial aumentou a penetração e tornou o ligante mais susceptível a temperatura, além de reduzir o ponto de amolecimento, fazendo com que seu uso seja limitado a locais com temperatura moderada. O óleo também afetou a resistência a deformação permanente, especialmente nos teores maiores ou iguais a 4%, onde houve redução da temperatura superior pelos critérios do *Superpave*.

Luo, Zhang e Cong (2017), nos seus estudos com o óleo de cozimento descartado, notaram que os ensaios mostraram que a adição de óleo gerou uma ação antienvelhecimento. Por outro lado, houve um aumento de módulo no *frequency sweep* conforme a frequência aumentava, de modo que foi identificado que o comportamento em baixas temperaturas é

inferior. O bioligante obteve melhor comportamento quanto a deformação no MSCR e também melhor desempenho quanto a estocagem.

Dong *et al.* (2019) estudaram o óleo de cozimento descartado em teores entre 10% e 20%. Os ensaios químicos identificaram que o bioligante e o ligante asfáltico apresentavam componentes similares, porém o bioligante apresenta compostos como ésteres e ácidos que podem ser prejudiciais aos desempenhos em altas e baixas temperaturas, fazendo-se necessário o uso de polímeros para mitigar esses efeitos. O bioligante apresentou bom comportamento quanto ao envelhecimento e as propriedades reológicas analisadas apresentaram bom desempenho no teor de 15%.

Sun *et al.* (2019) estudaram a adição do óleo de cozimento descartado no ligante asfáltico em teores entre 4% e 16%. A adição do bio-óleo reduziu a viscosidade e por consequência, as TUC. O aumento do teor de bio-óleo reduziu o módulo complexo de forma que a adição melhorou o ligante quanto ao trincamento térmico, mas piorou seu desempenho quanto à deformação permanente. Os resultados indicaram que o bioligante tem potencial de uso em regiões frias e/ou em ligantes reciclados.

Cao e Wang (2019) estudaram os teores entre 1% e 5%. O trabalho focou no estudo da fadiga e encontrou que o aumento no teor de óleo gera um amolecimento do ligante e causou um aumento na resistência a fadiga, com teor ótimo de 3%, de acordo com os parâmetros analisados.

Cao, Wang e Wang (2019) buscaram estudar o efeito do bio-óleo de descarte de cozimento na fadiga de ligantes asfálticos. A inclusão do bio-óleo tornou o ligante não envelhecido mais mole, com aumento no ângulo de fase, diminuindo a resistência a deformação e a recuperação elástica. Com o envelhecimento do material, os efeitos foram revertidos. Os parâmetros reológicos de fadiga indicaram um aumento no desempenho quanto a esse parâmetro que decaiu conforme o envelhecimento das amostras. No geral os autores apresentaram que o bio-óleo pode ser usado efetivamente como modificante de ligantes asfálticos e rejuvenecedor de ligantes envelhecidos com o propósito de melhorar o desempenho quanto à fadiga.

Wang, Chie e Cao (2019) fizeram uma extensa análise do uso do óleo de cozimento nos teores de 1% a 5%. Os resultados do fracionamento SARA indicaram que o ligante convencional possui uma resistência ao envelhecimento maior que os bioligante. O resultado foi semelhante no ensaio de cromatografia de permeação em gel (GPC). Com relação à degradação térmica, os materiais apresentaram perdas de massa semelhantes, porém nas TUC o bioligante envelhecido apresentou menor estabilidade, levantando questões sobre uso do

bioligante em misturas recicladas. Os ensaios reológicos mostraram que a adição de bioligante baixa a resistência a deformação permanente em altas temperaturas, que foi o limitante dos teores utilizados. Os comportamentos quanto ao envelhecimento foram semelhantes ao ligante convencional. Com relação à fadiga em temperaturas intermediárias, houve desempenho melhor com o uso do bioligante e houve melhora na susceptibilidade ao envelhecimento quanto a esse parâmetro. O envelhecimento oxidativo melhorou o potencial de recuperação elástica de todos os ligantes, porém os maiores teores (3% e 5%) reduziram levemente a recuperação elástica e a resistência ao envelhecimento. Os autores sugeriram que deveriam ser realizados mais estudos quanto a melhoria de desempenho, em especial a deformação permanente, para a possibilidade de uso em engenharia.

Niu *et al.* (2021) avaliaram o óleo de cozimento em teores de 2,5% a 10%. Os ensaios de ductilidade, viscosidade, penetração e ponto de amolecimento indicaram que o teor ótimo de óleo a ser adicionado é de 2,5 a 5%. O óleo demonstrou aumentar a resistência do material em baixas temperaturas, porém piorou seu comportamento nas temperaturas altas.

O bioligante a base óleo de cozimento foi testado por Ma *et al.* (2020) em asfalto borracha. O teor ótimo encontrado foi definido com base na estabilidade a estocagem e foi de 6% de óleo de cozimento adicionado. A adição do óleo promoveu a redução na viscosidade do ligante com a borracha, incidindo em menores temperaturas de usinagem e compactação, de modo a reduzir custos e impactos ambientais. Os ensaios de desempenho verificaram que a adição do óleo reduziu a capacidade do ligante de atuar em altas temperaturas enquanto melhorou seus resultados quanto a resistência ao trincamento térmico. O bioligante mostrou um bom desempenho na redução de envelhecimento quando comparado ao ligante virgem.

2.4.4 Principais estudos acerca de materiais vegetais diversos para emprego em bioligantes

Cuadri *et al.* (2014) estudaram o óleo de mamona no teor de 2%. Foi observado um melhor desempenho quanto à susceptibilidade térmica no bioligante. Também foi notada uma melhora nos parâmetros de deformação permanente, de acordo com os critérios do *Superpave*.

Zeng *et al.* (2016) estudaram também o óleo da mamona, mas com teores de até 30%. Foram realizados apenas ensaios empíricos e eles observaram um amolecimento excessivo do ligante com a adição do bio-óleo, além de uma redução na ductibilidade.

Yan *et al.* (2020) procuraram encontrar o teor ótimo de óleo de mamona como aditivo no bioligante. O trabalho consistiu na construção de uma matriz através do uso de vários teores de bio-óleo a fim de se determinar o teor ótimo a ser utilizado. Foram estudados teores

entre 8,8 e 35%. A adição apenas do bio-óleo prejudicou o desempenho em altas temperaturas, porém a adição de asfalto natural (obtidos de lagos naturais) corrigiu esse problema e a mistura final apresentou um desempenho melhor. A adição desses dois materiais também mostrou melhora no desempenho quanto à deformação permanente. Não foram encontrados resultados conclusivos quanto ao desempenho em baixa temperatura.

Lei *et al.* (2018a) estudaram o uso de um bio-óleo derivado do caule e folhas do milho, resíduos que ficam após a extração do vegetal para sua comercialização. A aplicação foi realizada em asfalto modificado com borracha. A adição do bio-óleo melhorou o desempenho em altas temperaturas do ligante. Não foram encontrados efeitos adversos no estudo, o que fez os autores sugerirem a substituição do ligante pelo bio-óleo sem prejuízo ao desempenho do ligante, nos teores estudados.

Lei *et al.* (2018b) aplicaram o bioligante a base dos resíduos da plantação de milho e também foi realizada a avaliação de desempenho no mástique. A adição do bio-óleo enfraqueceu a estabilidade térmica do bioligante geral. O bioligante obteve um ganho de resistência quando analisado o mástique. O bioligante mostrou bons resultados em baixas temperaturas, porém quando analisado em altas temperaturas notou-se uma sensibilidade ao aumento de temperatura.

Kumar *et al.* (2018) estudaram o bio-óleo obtido da casca da semente da *Mesua Ferrea*, árvores nativas do sudeste asiático. A adição do bio-material aumentou o desempenho quanto à deformação permanente, tanto pelo parâmetro analisado pelo *Superpave* ($G^*/\sin(\delta)$) quanto pelo MSCR diminuindo o dano acumulado e a compliância não recuperável enquanto diminuiu a susceptibilidades quanto ao envelhecimento.

Alamawi *et al.* (2019) estudaram o uso do bio-óleo da semente de palma no ligante asfáltico em altos teores, chegando a 60%. Houve redução de até 10% nas temperaturas de usinagem e compactação. A análise da energia de ativação mostrou uma maior resistência ao fluxo nos bioligantes. A susceptibilidade térmica dos bioligantes foi semelhante ao ligante comum. O comportamento na TGA foi semelhante até a temperatura de 165 °C. No geral os resultados indicaram que o bioligante tem propriedades químicas e térmicas semelhantes ao ligante puro e podem ser otimizados para aplicação.

Terzi *et al.* (2020) investigaram um bio-óleo derivado da polpa da rosa, nos teores de 2% e 4%. O *frequency sweep* mostrou que o parâmetro de deformação permanente diminui conforme o teor de bio-óleo aumenta, porém, essa relação se inverte após envelhecimento no RTFO. Entretanto, após o envelhecimento de longo prazo, apenas o modificado com 2% apresentou resultado melhor. Não houve alteração nas temperaturas de PG. Usando o ensaio de

Resistencia à Tração, verificou-se que os bioligantes tinham melhores resistências aos danos por umidade, conforme os teores. O *Hamburg Wheel Test* confirmou que a resistência à deformação permanente diminui conforme o teor aumenta do bio-óleo, porém ainda se atingiu valores dentro do limite.

Uchoa *et al.* (2021) estudaram o óleo da castanha de caju epoxidado nos teores de 10% e 20%. Os bioligantes estudados apresentaram um bom desempenho quanto à estabilidade a estocagem, indicando boa compatibilidade entre os materiais. A amostra com 10% apresentou melhores resultados entre os teores analisados, com maior resistência à deformação permanente verificada no ensaio de MSCR e maior resistência à fadiga no ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS). O teor também apresentou um bom desempenho no ensaio de adesividade BBS, de modo que se verificou que a adição do biomaterial melhorou o desempenho do ligante asfáltico nesse quesito e apresentou boa compatibilidade com os agregados utilizados.

Ahmad *et al.* (2021) realizaram pesquisa com o bio-óleo derivado da pirólise do bagaço da cana de açúcar. O ensaio de FTIR indicou que não houve reação química devido a mistura dos materiais. Houve redução no ponto de amolecimento e aumento na ductibilidade. Quanto à varredura de frequência (*frequency sweep* – FS), observou-se que o comportamento de alta temperatura não se alterou, entretanto houve melhora quanto aos parâmetros de fadiga. O ensaio de BBS indicou a susceptibilidade à umidade, uma vez que quanto maior o teor de bio-óleo, maior a redução no valor de tensão de arrancamento quando submetido à condição saturada. Esse fenômeno foi corroborado pelo *Rolling Bottle Test* (RBTT), que é um ensaio de dano por umidade. Quanto às misturas, houve redução no módulo dinâmico, como esperado devido ao amolecimento do ligante. O *Copper Wheel Tracker Test* (CWTT) não captou mudanças significativas quanto à deformação permanente. O ensaio de fadiga mostrou que a adição de bio-óleo melhora a resistência à fadiga do material. Em geral, o material teve bons resultados quanto à deformação permanente e fadiga, porém os resultados de resistência à umidade indicam que a adição do bio-óleo faz com que o ligante fique mais suscetível à presença de água.

Mahssin *et al.* (2021) realizaram um processo de conversão de liquefação hidrotermal para obtenção do bio-óleo a partir de uma mistura de resíduos de alimentos: arroz, vegetais e frango. Os ensaios determinaram que o bio-produto obtido é adequado para mistura com o ligante asfáltico devido sua alta viscosidade e estabilidade térmica. Não foram verificadas alterações nas propriedades de estocagem nos teores estudados, e a susceptibilidade térmica é compatível com o ligante puro.

Salazar-Cruz *et al.* (2021) estudaram a adição de algas marinhas no ligante asfáltico em teores que iam até 4%. Foi notado que em teores acima de 2,5% as partículas de alga tendem a coalescer e formar uma estrutura tipo gel, reduzindo o desempenho do bioligante. Até o teor de 2,5%, notou-se o aumento na resistência à deformação permanente, principalmente em altas temperaturas, porém sem alterações de propriedades mecânicas na zona de baixa temperatura. Foi verificado também um ganho de estabilidade a estocagem. O teor com melhores resultados nos testes foi de 2,5%.

2.5 Considerações Finais

Através do processo de revisão sistemática percebe-se o crescimento, especialmente nos últimos 5 anos, das pesquisas em busca de materiais a fim de substituir os ligantes asfálticos na pavimentação. A maior parte dos trabalhos encontrados tenta encontrar um substituto parcial, com apenas 3 trabalhos (RAOUF E WILLIAMS, 2010; ESPINOSA *et al.*, 2021; MANKE *et al.*, 2021) investigando a substituição total.

Entre os materiais estudados, nota-se uma predominância dos derivados vegetais, em especial rejeitos da produção de alimentos, como o descarte de óleo de cozimento, bagaço da cana de açúcar e caule e folhas do milho. O foco em materiais com esse tipo de origem advém do fato que os bioligantes não devem competir com a indústria alimentícia e, ao mesmo tempo, o uso desses rejeitos propõe uma destinação ambientalmente mais adequada, de modo que diminui a chance desses materiais poluírem o ambiente.

Porém, deve-se notar que os estudos de bio-ligantes focam muito em misturas densas. Em geral os ensaios de verificação de desempenho desses materiais focam em características e parâmetros para uso em misturas e os resultados são descritos em viabilidade técnica para esse uso. Faz-se necessário então a verificação desses materiais para outros usos, como emulsões asfálticas, por exemplo, que podem ser utilizadas em tratamentos superficiais, microrrevestimentos e imprimações betuminosas. Em especial quando os materiais estudados não apresentam características adequadas para uso em misturas asfálticas.

3 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS POR PENETRAÇÃO

Este capítulo apresenta as informações sobre os Tratamentos Superficiais por Penetração e seus principais defeitos. São apresentados métodos de dosagem, caracterização e verificação de desempenho.

3.1 Tipos e características

Diversos autores empregam o termo tratamentos de superfície para englobar toda a família dos tratamentos superficiais betuminosos, sendo esses definidos como os revestimentos esbeltos de até 25 mm de espessura, onde as misturas podem ocorrer na própria pista ou previamente dosadas em laboratório (BERNUCCI *et al.*, 2008; LOIOLA, 2009; ABEDA, 2010; PEREIRA, 2013).

Destacam-se entre os tratamentos de superfície o Tratamento Superficial por Penetração, Tratamento Antipó, Capa Selante, Macadame Betuminoso, Lama Asfáltica, Microrrevestimento Asfáltico a Frio e o Cape Seal (LOIOLA, 2009; ABEDA, 2010; PINTO; PINTO, 2015). Apesar de não desempenharem nenhuma função estrutural no pavimento, esses revestimentos apresentam uma ampla aplicabilidade de serviços, como selagem de fissuras, rejuvenescimento e manutenção preventiva, além de outras aplicações, como camada antiderrapante (VASCONCELOS, 2013).

O Tratamento Superficial por Penetração (TSP) é um revestimento do grupo dos tratamentos de superfície que consiste em uma ou mais camadas sucessivas de ligante cobertas por agregados, seguido pelo processo de compactação. Quando se trata de uma única camada de ligante seguida de agregado, o ligante penetra de baixo para cima em um processo denominado penetração invertida. Em camadas múltiplas o processo de penetração do ligante no agregado se dá tanto de forma invertida como direta. A espessura final do revestimento dependerá da granulometria do agregado utilizado e do número de camadas, podendo variar de 5 a 20 mm (LARSEN, 1985).

O processo construtivo do Tratamento Superficial por Penetração (TSP) consiste na aplicação do ligante betuminoso através de um caminhão espargidor, seguido da distribuição de agregado. Posteriormente, são realizadas eventuais correções de imperfeições na distribuição antes da realização da compactação. O processo é encerrado com a aplicação do banho diluído de asfalto e sinalização da via.

O TSP possui diferentes nomenclaturas a depender do número de camadas de ligantes e agregados, sendo elas:

- a) Tratamento Superficial Simples (TSS), com uma única camada de ligante seguida de uma camada de agregado;
- b) Tratamento Superficial Duplo (TSD), com duas camadas de ligante e de agregado se intercalando, sendo que a segunda camada de agregado deve ser de granulometria menor que a primeira, e
- c) Tratamento Superficial Triplo (TST), com três camadas de ligante intercaladas com três camadas de agregado, com cada camada de agregado sendo de granulometria inferior a anterior.

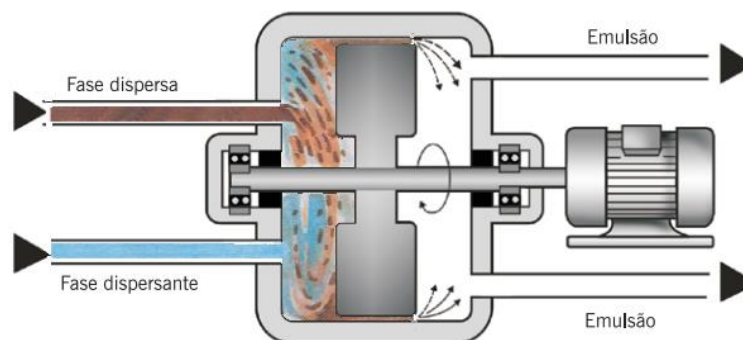
No caso do TSD e do TST a granulometria das camadas mais externas de agregado deve ser menor de forma que os agregados dessas ocupem os vazios deixados na superfície da camada anterior.

As principais funções do TSP são prover uma pista de rolamento de espessura delgada, altamente flexível, porém com alta resistência ao desgaste; promover a impermeabilização e rejuvenescimento de revestimentos trincados; promover a impermeabilização e proteção da infraestrutura do pavimento; aumentar a resistência ao deslizamento, através da promoção de uma textura antiderrapante; aumentar a resistência ao desgaste e a flexibilidade do pavimento; evitar trincas por fadiga, propiciando condições para que o pavimento acompanhe deformações relativamente grandes da infraestrutura e o selamento de trincas de base e sub-base cimentadas, evitando assim as reflexões destas nos revestimento denso a ser construído (LOIOLA, 2009).

3.2 Emulsão asfáltica

O ligante de uso mais comum no TSP é a emulsão asfáltica, um sistema de múltiplas fases composto de água, o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e emulsificante, e em alguns casos aditivos também se fazem presentes. A Figura 10 apresenta o esquema de fabricação de emulsão asfáltica com uso do moinho coloidal. O moinho é utilizado para realizar a “quebra” do asfalto em micropartículas de 1 a 20 μm , para a mistura com a fase dispersante, que consiste em uma solução de água com o emulsificante e outros agentes aditivos. O emulsificante tem a função de reduzir a tensão superficial do asfalto de modo que ele permaneça em suspensão no meio aquoso (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 10 – Representação esquemática de um moinho coloidal na fabricação de emulsão asfáltica



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Uma vez que a emulsão é aplicada no campo, ocorre uma interação entre o emulsificante e o agregado causando a separação das fases aquosa e do asfalto, onde a água evapora e o resíduo de asfalto permanece na mistura ligando os agregados. Esse processo é chamado de ruptura. No estado do Ceará, a emulsão recomendada pela Superintendência de Obras Públicas do Estado do Ceará (SOP-CE) para uso em tratamento superficial e a mais utilizada em obras desse tipo no estado é a emulsão asfáltica RR-2C, seguida da RR-1C, podendo-se utilizar ligantes modificados quando indicados no projeto (DERT-CE, 2000a; DERT-CE, 2000b). Na nomenclatura da emulsão “RR” equivale a ruptura rápida e o “C” indica que é uma emulsão catiônica.

Entre as vantagens do uso da emulsão asfáltica estão a sua trabalhabilidade e a redução no consumo de energia em sua aplicação, uma vez que essa ocorre a temperaturas em torno de 60 °C. No caso de TSP em que são comumente utilizadas emulsões de ruptura rápida, ainda se tem a vantagem da rápida liberação da pista ao tráfego. As emulsões de ruptura rápida, por outro lado, são muito sensíveis às variações de temperatura na aplicação e em outras etapas da construção, de modo que é extremamente importante que a duração de aplicação do ligante e o tempo entre a aplicação e a compactação sejam bem definidos (MESQUITA JÚNIOR, 2021).

Silva (2018) afirma que tanto a temperatura de aplicação quanto a de cura tem grande influência no desempenho dos TSP. Essa autora aponta que o aquecimento da emulsão para aplicação, em temperatura de aproximadamente 58°C, é um fator a ser considerado para o bom desempenho, além de assegurar uma melhor adesão entre o ligante e o agregado. Quanto à cura, a autora relatou que amostras curadas na estufa a 50°C apresentaram menor perda de agregados que aquelas curadas em temperatura ambiente (27°C).

3.2.1 Emulsion Performance Grade (EPG)

As seleções de materiais para tratamentos superficiais de acordo com as normas vigentes no Brasil ainda seguem critérios empíricos. E apesar desse tipo de revestimento gerar um incremento estrutural pouco significativo no pavimento, seu desempenho deve ser apropriadamente avaliado de forma que apresente um bom comportamento em serviço (ÁLVAREZ *et al.*, 2021).

Nesse sentido, Walubita *et al.* (2005) trabalharam na elaboração do *Surface Performance-Graded* (SPG), estabelecendo critérios de seleção de emulsões asfálticas através de análise de desempenho. O protocolo utilizou o *Bending Beam Rheometer* (BBR), o que os autores apontaram com um limitante nos ensaios em baixas temperaturas. Os autores também indicaram a necessidade de construção de pistas experimentais controladas, para validação dos resultados.

Vijaykumar (2012) apresentou uma validação do SPG e indicou a necessidade de se correlacionar parâmetros do ensaio de MSCR do resíduo da emulsão com o desempenho em campo e também a troca do BBR pelo ensaio de varredura de frequência (FS) no DSR. O uso do FS também foi sugerido por Johnston *et al.* (2008) que também sugeriram o uso do modelo Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) para tratamento dos dados obtidos e obtenção da curva mestra.

O *Emulsion Performance Grade* (EPG) surgiu dos estudos derivados do projeto NCHRP 09-50 e tem como objetivo avaliar as emulsões asfálticas utilizadas em TSP e microrrevestimento com base em critérios de desempenho que levam em consideração os defeitos, condições climáticas e tráfego (NSCEM, 2017). Através de análise de banco de dados, foram selecionados os defeitos que tem como causa o material utilizado e quais características do material são críticas para a durabilidade do pavimento.

Para tratamentos superficiais, os autores identificaram que a emulsão utilizada afetava a perda de agregados em baixa temperatura e a exsudação. Para a perda de agregados, o fator crítico era a rigidez do ligante utilizado em um ângulo de fase crítico obtido no ensaio de *frequency sweep*, enquanto para a exsudação, a correlação encontrada foi da compliância não-recuperável J_{nr} obtida no ensaio de MSCR. Esses ensaios foram realizados com o resíduo da emulsão. Foram definidos ainda ensaios no viscosímetro rotacional com a emulsão fresca, a fim da determinação de parâmetros de trabalhabilidade e estocagem do material (NSCEM, 2017).

Mesquita Júnior (2021) avaliou dois tipos de emulsões asfálticas mais comuns em serviços de TSP no Ceará, a RR-2C e a RR2C-E, por meio do protocolo EPG. A primeira utiliza em sua composição o ligante asfáltico comum, enquanto a segunda usa um ligante modificado por polímero. Em seu trabalho, o autor analisou a influência do envelhecimento no parâmetro J_{nr} . O autor verificou que conforme a amostra era submetida ao envelhecimento, havia uma queda no parâmetro, e por consequência, um aumento no nível de tráfego a qual o pavimento poderia ser submetido, considerando a temperatura superior, correspondente a exsudação. O autor identificou que a emulsão RR-2C é mais susceptível a exsudação em seus estágios iniciais de vida de serviço, do que a emulsão com polímero, que apresentou melhor desempenho nesse parâmetro.

3.3 Dosagem dos Tratamentos Superficiais por Penetração

Os métodos de dosagem das taxas de aplicação do TSP ainda hoje são, em sua maioria, baseados em características volumétricas dos componentes da mistura, o ligante e o agregado, de forma a garantir que o agregado penetre suficientemente no ligante para que seja formada a ligação entre eles (ALVAREZ *et al.*, 2019). Dificilmente se encontram métodos de dosagem que não sejam totalmente empíricos, e os próprios órgãos reguladores, sejam eles nacionais ou estaduais, apenas indicam taxas fixas de agregado e ligante sem considerar as diferentes origens do agregado ou aditivos no ligante, entre outros fatores que podem influenciar diretamente o desempenho e qualidade do TSP (SILVA, 2018).

Em geral, pode-se afirmar que existem duas formas de dosagem para TSP, os métodos diretos e os indiretos. No primeiro a taxa de agregado é determinada de forma experimental, enquanto no segundo as quantidades de ligante e de agregado são determinadas por fórmulas que variam de acordo com o método utilizado (PEREIRA, 2013).

3.3.1 Métodos indiretos

Nos métodos indiretos, a quantidade de agregados por m^2 depende da sua forma e tamanho, considerando que o objetivo é conseguir um arranjo uniforme dos agregados sem superposição (PEREIRA, 2013). Destacam-se entre esses os métodos de Hanson, da Califórnia, de Linckenheyl, de Lovering e de Tagle e Podestá, descritos em Pinto e Pinto (2015).

Pinto e Pinto (2015) apresentam que Hanson, em seus estudos na Nova Zelândia, mostrou que apenas os agregados do fundo da camada entram em contato com o ligante e, assim, o tapete de agregado tem espessura de um grão, sem sobreposição de fragmentos

aglutinados pelo ligante. Logo, após seu espalhamento, o agregado encontra-se com orientação aleatória e o teor de vazios está em torno de 50%. A compactação promove um rearranjo das partículas, posicionando sua maior dimensão na horizontal, e o teor de vazios é reduzido a 30%. A última modificação na posição das partículas de agregado se dá com o tráfego, resultando em um teor de vazios de 20%. Desse teor de vazios final, considera-se que o teor de ligante corresponde de 50% a 70% (PEREIRA, 2013; PINTO; PINTO, 2015).

O método da Califórnia surgiu devido as diferentes características dos agregados californianos comparados aos neozelandeses. Com esse método surgiu o conceito de Tamanho Máximo Efetivo (TME) que é definido como a abertura da malha da peneira na qual passa 90% do agregado. No método Linckenhayl admite-se que a dosagem do agregado se relaciona com os diâmetros máximo (D), abertura da malha na qual passa 90% do agregado, e mínimo (d) das partículas, abertura da malha na qual passa 10% do agregado, onde $d \geq 0,6 \times D$.

O método de Lovering relaciona o Módulo de Espalhamento (M) com a quantidade de agregado necessária para formar um mosaico sem superposição das partículas. O módulo de espalhamento é calculado a partir da média ponderada das proporções que contêm 20% de fragmentos pequenos, 60% de médios e 20% de grandes.

O método de Tagle e Podestá também usa o conceito de tamanho máximo efetivo, porém foi relatado que a relação entre o diâmetro máximo (D) e mínimo (d) do agregado é mais importante que a curva de distribuição granulométrica.

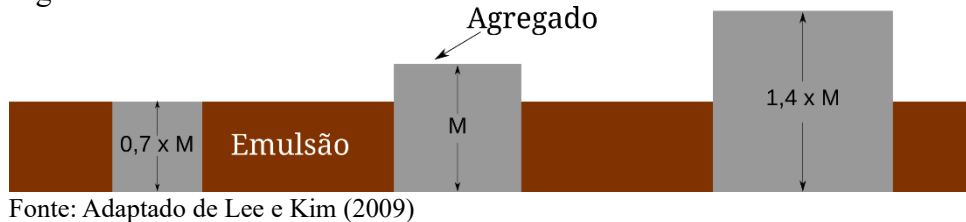
Idealmente, os agregados utilizados em TSP devem ser os mais uniformes possíveis, a fim de garantir uma homogeneidade do revestimento, uma vez que o processo construtivo é realizado em campo. Com agregados de tamanhos diferentes, os menores poderiam ser “afogados” no ligante, enquanto os maiores poderiam se soltar facilmente em razão da fina camada de ligante (TRANSIT; RCS, 2005).

Tamãna a importância da uniformidade dos agregados que foi introduzido o parâmetro teórico *Performance-Based Uniformity Coefficient* (PUC) que é o coeficiente de uniformidade baseado em desempenho conforme Lee e Kim (2009). Esse coeficiente pode ser um indicativo da adequabilidade do agregado para emprego em TSP, uma vez que o risco de falha por excesso de ligante ou perda de agregado teoricamente seria reduzido através da escolha adequada da graduação dos agregados (SILVA, 2018). O conceito do PUC foi desenvolvido por Lee e Kim (2009) e trazido ao meio científico nacional por Silva (2016).

O PUC agrega o critério de falha de McLeod, ilustrado na Figura 11, e o Coeficiente de Uniformidade (CU) utilizado para os solos. O critério de McLeod indica que uma alta quantidade de partículas de agregado menores que 70% do tamanho mediano dos agregados

gera exsudação, enquanto partículas maiores que 140% do tamanho mediano gera perda de agregados no revestimento (LEE; KIM, 2009). O CU quantifica a uniformidade em função dos diâmetros nos quais se observam 60% e 10% de material passante, conforme Equação 3.1.

Figura 11 – Critério de McLeod



$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1)$$

Onde: D_{60} é o diâmetro correspondente a 60% de material passante;

D_{10} é o diâmetro correspondente a 10% de material passante.

A partir desses conceitos pode-se calcular as porcentagens de excesso de ligante e de perda de agregados conforme as Equações 3.2 e 3.3, e o PUC pode ser calculado em função dessas duas variáveis, como mostrado em Equação 3.4.

$$\text{Excesso de ligante (\%)} = P_{EM} \quad (3.2)$$

$$\text{Perda de agregados (\%)} = 100 - P_{2EM} \quad (3.3)$$

$$PUC = \frac{P_{EM}}{P_{2EM}} \quad (3.4)$$

Onde:

M é a mediana da curva granulométrica;

P_{EM} é o percentual que passa, retirado da curva granulométrica do agregado, correspondente ao diâmetro $0,7 \times M$. Representa a quantidade de agregado com tamanho muito menor que o da mediana e apresenta riscos de exsudação;

P_{2EM} é o percentual que passa, retirado da curva granulométrica do agregado, correspondente ao diâmetro $1,4 \times M$. Representa a quantidade de agregado com tamanho muito maior que o da mediana e que apresenta riscos de se soltar do revestimento.

Lee e Kim (2009) concluíram em seus estudos que quanto menor o PUC, mais adequado o agregado será para aplicação em serviços de TSP, uma vez que o PUC é diretamente

proporcional ao parâmetro P_{EM} , que representa os riscos de exsudação e inversamente proporcional ao P_{2EM} , que se relaciona com a perda de agregados.

3.3.2 Métodos diretos

Entre os métodos diretos, destacam-se o método da bandeja e o método da caixa dosadora, sendo o primeiro o mais usual. O método da bandeja consiste em acomodar o agregado em uma bandeja de dimensões conhecidas (50cm×50cm) com fundo vermelho. O agregado é posicionado de forma a gerar uma camada uniformizada, com o mínimo de vazios que permitam ver o fundo da bandeja e sem sobreposição de agregados, conforme a Figura 12. No caso do TSD após o posicionamento da primeira camada, coloca-se a segunda camada de agregado.

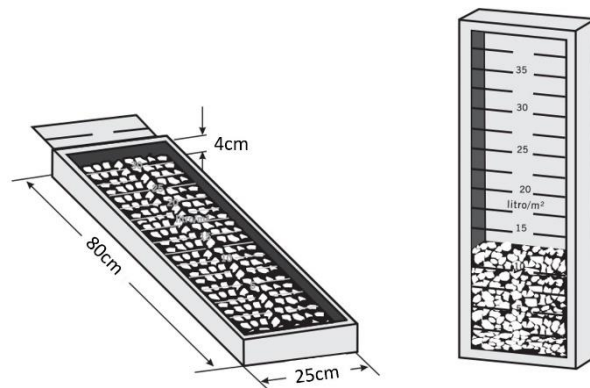
Figura 12 – Método da bandeja



Fonte: Pereira (2013)

O método da caixa dosadora é recomendado por Larsen (1985), com o agregado posicionado no fundo de uma caixa de dimensões 80cm×25cm×4cm, de forma semelhante ao processo do método da bandeja. Posteriormente coloca-se a caixa na posição vertical e faz-se a leitura da taxa de agregado, em L/m^2 , de acordo com a graduação marcada na tampa transparente da caixa, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Caixa dosadora



Fonte: Larsen (1985)

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) especifica taxas limites de aplicação de agregado e ligante asfáltico para TSS (DNIT, 2012a), TSD (DNIT, 2012b) e TST (DNIT, 2012c), conforme valores da Tabela 4. As taxas mostradas nessa tabela, principalmente para TSD e TST, são bem maiores que as calculadas por outros métodos de dosagem. Taxas de 20 kg/m^2 não são praticadas em campo, segundo afirmações de engenheiros da SOP-CE (PEREIRA, 2013).

Tabela 4 – Taxas de aplicação do DNIT

Camada	Taxa de ligante (L/m ²)	Taxa de agregado (kg/m ²)
Tratamento Superficial Simples		
Única	0,8 – 1,2	8 – 12
Tratamento Superficial Duplo		
1 ^a	1,2 – 1,8	20 – 25
2 ^a	0,8 – 1,2	10 – 12
Tratamento Superficial Triplo		
1 ^a	1,0 – 1,5	20 – 25
2 ^a	0,6 – 0,9	10 – 12
3 ^a	0,4 – 0,6	5 – 7

Fonte: DNIT (2012a), DNIT (2012b), DNIT (2012c)

Observa-se ainda na Tabela 4 que as taxas de ligante asfáltico não variam conforme o tipo de emulsão utilizada e as taxas de agregados também consideram que todos os agregados apresentem densidades próximas. Tais fatos resultam em dosagens ineficientes ao se considerar as especificidades dos projetos, uma vez que o uso de um agregado mais denso pode resultar em falta de agregados e a taxa de ligante uniforme pode causar problemas com falta ou excesso de ligante no pavimento.

3.3.3 Taxas de aplicação da SOP-CE

As taxas de aplicação no estado do Ceará são determinadas de acordo com as especificações do antigo Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes (DERT-CE), que hoje integra a Superintendência de Obras Públicas (SOP-CE), a DERT-ES-P 10/00 para TSS e DERT-ES-P 11/00 para TSD (DERT - CE, 2000a; DERT-CE, 2000b). O método usado nessas especificações originou-se do método de Tagle e Podestá.

Confirma-se a taxa de agregado determinada por essa formulação pelo método da bandeja, determinando-se a taxa efetiva em peso e posteriormente transformando em volume através da massa específica solta, obtida com uma caixa de madeira de dimensões internas de 30cm×30cm×20cm. A taxa de agregado a espalhar em volume é igual à taxa efetiva de agregado, acrescida de 5%.

A taxa de emulsão asfáltica é calculada em função da taxa de agregado de acordo com as expressões a seguir, sendo a Equação 3.5 e Equação 3.6 para TSS e Equação 3.7 e Equação 3.8 para TSD (DERT-CE, 2000a; DERT-CE, 2000b). A utilização do TST não é prática comum no estado do Ceará, sendo assim não existe uma especificação para o serviço no estado (PEREIRA, 2013).

$$T_{RR-1C} = 0,126 \times T_{ag} \quad (3.5)$$

$$T_{RR-2C} = 0,117 \times T_{ag} \quad (3.6)$$

$$T_{RR-1C} = 0,121 \times T_{ag} \quad (3.7)$$

$$T_{RR-2C} = 0,112 \times T_{ag} \quad (3.8)$$

3.4 Defeitos em tratamentos superficiais

Em tratamentos superficiais, defeitos de trincamento e deformação permanente vem das camadas granulares, uma vez que os tratamentos acompanham as deformações da base sobre a qual está construído o revestimento (LOIOLA, 2009). De acordo com Lee e Kim (2008) os principais defeitos aos quais o TSP está sujeito são a perda de agregados e a exsudação. A perda de agregados é geralmente associada a uma alta taxa de aplicação de agregados ou uma baixa taxa de aplicação de ligante, e a exsudação é geralmente associada a uma alta taxa de aplicação de ligante. Esses fenômenos são considerados como parte do processo natural do revestimento quando ocorrem dentro de certos limites (SILVA, 2018).

A perda de agregados pode ocorrer em diferentes estágios de utilização da via. A perda de agregados precoce pode ser consequência de uma força de ligação entre agregado e ligante insuficiente antes da liberação da via para o tráfego ou então quando a liberação ocorre antes do devido tempo de cura da emulsão. Fatores como chuva, taxa de agregados excessiva, compactação, agregados com presença de finos, entre outros também desempenham um importante papel. Estudos apontam que é na fase inicial da vida do pavimento onde a perda de agregado acontece com maior intensidade, com a tendência de diminuição dessa perda com o passar do tempo (AKTAS et al., 2013; ADAMS, 2014; ADAMS *et al.*, 2017).

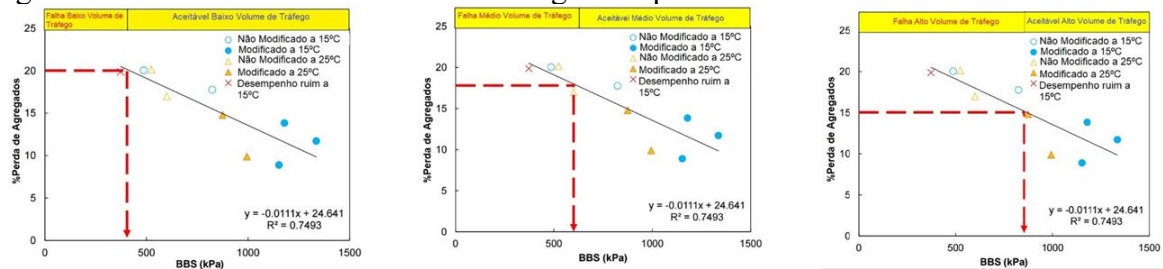
A perda de agregado tardia pode ser resultado da falta de ligação entre agregado e asfalto em temperaturas intermediárias ou falha coesiva do resíduo asfáltico em baixa temperatura. Tem-se ainda a perda de agregados “molhada” causada pelo dano por umidade, que causa uma redução significativa na ligação adesiva entre agregado e ligante e pode acelerar a perda de agregado em temperaturas intermediárias (ADAMS *et al.*, 2017).

Aktas *et al.* (2013) estudaram o efeito das propriedades como porosidade, graduação, presença de pós, entre outras, da superfície do agregado na sua retenção em TSP, apresentando a grande importância dessas para efetiva adesão entre o agregado e o ligante. Também é apresentado que agregados pré-cobertos com ligante resultam em uma menor perda de agregado quando comparados com agregados com presença de pó e agregados lavados. Nesse trabalho houve também a recomendação do uso de ligantes modificados para aumento de desempenho em climas quentes e tráfego pesado.

Adams (2014) se propôs a encontrar correlações entre o ensaio *Binder Bond Strength* (BBS) e a perda de agregado em TSP com diferentes ligantes, de modo que, a partir de um limite de perda de agregados, baseado no volume de tráfego a qual a via será submetida, encontre-se o valor de BBS mínimo que a compatibilidade entre o ligante e o agregado seja adequada ao nível de tráfego, como ilustrado na Figura 14.

Adams *et al.* (2017) relataram que a perda de agregados pode não estar inerentemente relacionada entre as especificações da emulsão, pois as ligações formadas entre o agregado e o ligante são influenciadas pelas interações químicas e físicas que ocorrem entre os materiais durante o processo de cura. Em vez disso, a perda de agregados deve ser levada em consideração durante o processo de dosagem do TSP para assegurar a compatibilidade entre a emulsão e o agregado utilizados na mistura.

Figura 14 – Limites de resultado no BBS sugeridos por Adams



(a) Limite de 400 kPa para baixo volume de tráfego com 20% de perda de agregado

(b) Limite de 600 kPa para médio volume de tráfego com 17,5% de perda de agregado

(c) Limite de 800 kPa para alto volume de tráfego com 15% de perda de agregado

Fonte: Adaptado de Adams (2014)

3.5 Estudos de desempenho com TSP

3.5.1 Perda de agregados

Loiola (2009) e Pereira (2010, 2013) adaptaram o ensaio *Wet Track Abrasion Test* (WTAT) para o estudo do desempenho do TSD quanto à perda de agregados. O WTAT, ilustrado na Figura 15, é um equipamento utilizado para a determinação da dosagem de lamas asfálticas e microrrevestimentos sob condição de abrasão úmida, seguindo o método da NBR 14746 (ABNT, 2014). Esse ensaio avalia o desgaste da mistura quando sujeita a ação do tráfego, utilizado para a determinação do teor ótimo de emulsão de uma dada mistura de agregado e/ou aditivos.

Figura 15 – Equipamento utilizado no WTAT



Fonte: Loiola (2009)

Na adaptação do ensaio foram utilizadas mantas asfálticas e moldes metálicos, de mesma dimensão da cuba utilizada no WTAT (286 mm de diâmetro). Nesses moldes o TSP é aplicado, procurando realizar procedimentos similares aos da aplicação de ligante e agregado em campo, com o objetivo de se conseguir um revestimento similar ao realizado nas rodovias. O objetivo da adaptação do ensaio é analisar o desempenho das taxas e dos materiais utilizados nesse tipo de revestimento. Manteve-se a metodologia da NBR 14746, adaptando-se a manta asfáltica e o molde metálico.

O ensaio consiste na construção em laboratório de revestimentos do tipo TSP. Em um molde metálico sobre uma manta asfáltica se realiza a aplicação do ligante com a utilização de um pincel para o espalhamento, seguida da aplicação do agregado de forma manual. O processo de compactação de Loiola (2009) era realizado com o auxílio de um cilindro metálico de 2". O revestimento passa então por um processo de cura e é submerso em água, com a posterior realização do ensaio de WTAT. O processo é ilustrado para um TSD na Figura 16.

Figura 16 – Metodologia utilizada por Loiola para moldagem e ensaio em laboratório



Fonte: Loiola (2009)

Pereira (2010) utilizou um cilindro preenchido de concreto com peso de 55 kg no seu processo de compactação, para simular os rolos compactadores de campo. Essa mudança foi realizada a fim de melhorar a repetibilidade do processo, fazendo-o independente da força

do operador, uma vez que a compactação era realizada pelo peso próprio do rolo. Pereira (2013) introduziu um carrinho distribuidor de agregados, eliminando a subjetividade que havia no procedimento anteriormente onde o agregado era distribuído manualmente pelo operador. O carrinho, simulando o papel do caminhão distribuidor de agregado, faz com que os agregados caiam de forma livre e aleatória, semelhantemente ao procedimento de campo. O rolo e o carrinho são mostrados na Figura 17.

Figura 17 – Rolo compactador e carrinho distribuidor de agregados



a) Rolo compactador
Fonte: Pereira (2010)



b) Carrinho distribuidor de agregados
Fonte: Pereira (2013)

Loiola (2009) também realizou moldagem *in situ* para a realização do ensaio de WTAT, onde o molde utilizado no ensaio foi colocado na pista, de forma que quando a aplicação do TSD era realizada, o molde recebia as aplicações de ligante e agregado e a compactação da mesma forma que a pista real. O procedimento é mostrado na Figura 18.

Pereira (2013) apresentou em sua pesquisa uma escala, apresentada na Tabela 5, para a classificação em laboratório do desempenho do TSP com base nos resultados de perda de agregados apresentados por esses revestimentos no ensaio de WTAT.

Tabela 5 – Escala de classificação do TSP com base na perda de agregados

Perda de agregados (D)	Classificação
< 10%	Muito bom
$10\% \leq D < 20\%$	Bom
$20\% \leq D < 30\%$	Regular
$\geq 30\%$	Ruim

Fonte: Adaptado de Pereira (2013)

Figura 18 – Metodologia utilizada por Loiola para moldagem em campo



3.5.2 Exsudação

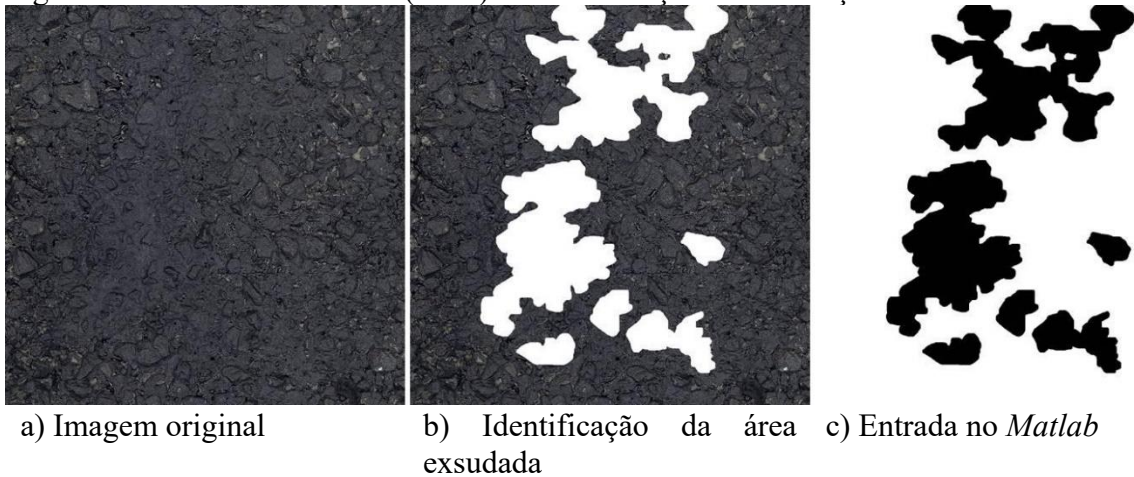
A exsudação é um dos principais defeitos encontrados em pavimentos de TSP, sendo assim, devido à escassez de metodologias para a avaliação desse fenômeno. Inicialmente, acreditava-se que esse defeito era causado apenas por problemas de dosagem, com a aplicação de uma taxa muito elevada de ligante asfáltico, porém, verificou-se que ainda que fosse um fator importante, não era o único e, portanto, se deveria investigar outras causas (SILVA, 2018).

Os primeiros estudos foram voltados a avaliação da exsudação em laboratório, de modo a identificar a severidade do defeito em situação controlada. Foram então desenvolvidos diversos métodos de Processamento Digital de Imagens (PDI), de modo que utilizassem *softwares* para fazer a quantificação da intensidade da exsudação.

Lee e Kim (2008) utilizaram o *National Instruments Vision Assistant* (NIVA) 7.0, que utilizava um processo de análise de imagens em escala de cinza para a montagem de um histograma da intensidade de cor. Esse método tinha problemas com a identificação de sombreamentos e texturas, que influenciavam os resultados finais.

Adams (2014) usou o *Matlab* para a análise de suas imagens. O autor utilizava o *software* para dividir a imagens em áreas pretas, que eram as áreas onde o ligante havia aflorado, e áreas brancas, que era o restante da amostra. A proporção entre a área preta e a área da amostra resultava na taxa de exsudação. O processo é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Método de Adams (2014) de identificação da exsudação com PDI



Fonte: Adams (2014)

Chaturabong (2014) propôs a utilização do *Image Processing & Analysis System 2* (iPas 2), desenvolvido pelo *Modified Asphalt Research Center* (MARC). Esse *software* originalmente era utilizado para a avaliação de misturas asfálticas, porém o autor adaptou seu uso para TSP. As amostras eram submetidas ao ensaio *Loaded Wheel Test* (LWT), que é um ensaio de microrrevestimento asfáltico. O equipamento é mostrado na Figura 20.

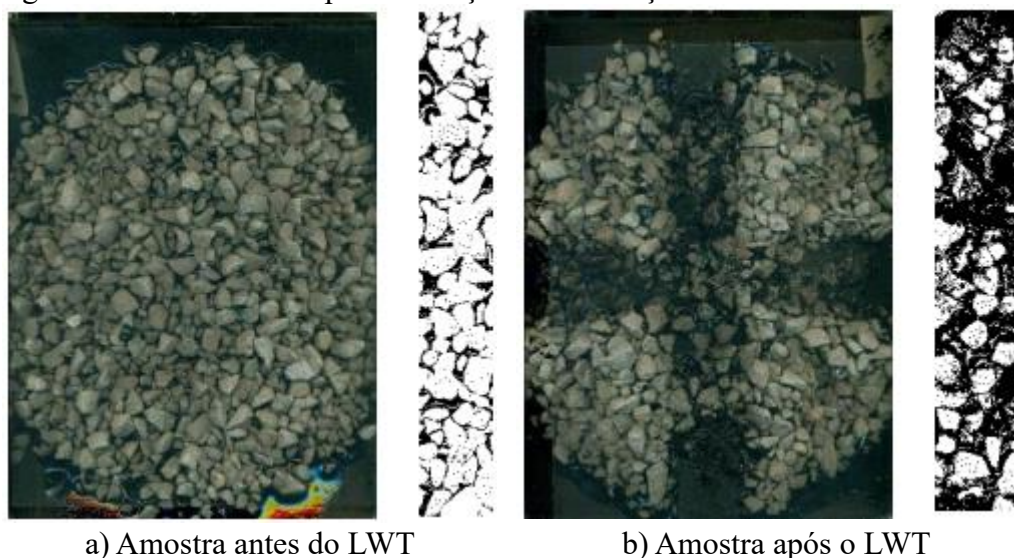
Figura 20 – Equipamento LWT



Fonte: Elaborada pelo autor.

Chaturabong (2014) realizou o ensaio em diferentes condições de carregamento, ciclos, temperaturas de ensaio e de cura. O autor identificou que a exsudação tende a aumentar com a temperatura do pavimento, indicando a necessidade de estudos a respeito desse defeito em localidades com temperaturas mais altas. A amostra antes e após o ensaio no LWT é apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Uso do LWT para avaliação da exsudação em TSP



Fonte: Chaturabong (2014)

Silva (2018) utilizou o método de Chaturabong (2014) para avaliação de materiais e métodos de dosagem comumente utilizados no estado do Ceará. A autora identificou que a temperatura ambiente não é a mais adequada para a realização do ensaio, uma vez que a exsudação afeta o pavimento principalmente em temperaturas mais elevadas. Ainda foi identificado que as amostras dosadas conforme os métodos do DNIT e da SOP-CE apresentam baixas taxas de ligante aplicadas, o que faz com que as amostras sejam mais susceptíveis a perda de agregado no ensaio. Por fim, a autora indica que o método é pouco adequado se executado conforme o método da SOP-CE, devido a presença do banho diluído, que dificulta a identificação da exsudação.

Nos últimos anos vêm-se estudando o efeito das propriedades reológicas na exsudação. Chaturabong (2014) estudou a correlação entre a compliância não-recuperável (J_{nr}) obtida no ensaio de MSCR com a exsudação, obtendo uma boa correlação entre os dois parâmetros para diversos níveis de tráfego. Esse parâmetro estuda a parcela da exsudação causada pela fluência do ligante, no qual o mesmo acaba, em situações de alta temperatura ou

alto carregamento, fluindo para a superfície do tratamento superficial. NASCM (2017) incorporou esse parâmetro no EPG, para avaliação de exsudação em ligantes a serem utilizados em tratamentos superficiais ou microrrevestimentos.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os métodos de dosagem e seleção de materiais para construção de TSP, além dos principais defeitos encontrados nesse tipo de pavimento. Foram apresentados também os principais ensaios de verificação de desempenho que podem ser realizados em laboratório, considerando os principais defeitos: perda de agregados e exsudação.

Apesar da evolução no critério de dosagem dos agregados por exemplo, nota-se que os critérios de dosagem de ligante são totalmente dependentes da taxa de agregados utilizados, não existindo ainda um método de dosagem mais direto. Os critérios de dosagem são voltados ainda apenas para os materiais mais comuns utilizados, sem a inclusão de materiais alternativos, tanto para agregados quanto para ligantes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos utilizados no plano experimental a fim do cumprimento dos objetivos da pesquisa.

4.1 Materiais

4.1.1 Agregado

Nesta pesquisa foi utilizada uma brita coletada na cidade de Maracanaú, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), na pedreira BritaCet. De acordo com análise petrográfica realizada por Diógenes (2018), as rochas dessa pedreira apresentam em sua composição principalmente gnaisse e granito. Foram coletadas duas frações, denominadas comercialmente de brita 0, nas frações de 3/4” e 5/8”. Uma das pilhas de agregados na pedreira onde foi realizada a coleta é mostrada na Figura 22.

Figura 22 – Pilha de agregados na pedreira



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Ligantes

Foram coletados dois ligantes asfálticos: (i) o CAP 50/70 que foi coletado para sua modificação com a seiva do aveloz e posterior emulsificação para estudo utilizando como base as proporções e emulsificante da emulsão RC1C-E (conforme item 4.3.3) e (ii) a emulsão asfáltica do tipo RR-2C que foi coletada por ser tradicionalmente utilizada em serviços de TSP no estado do Ceará. Ambos os ligantes foram coletados na empresa Asfaltos Nordeste, na cidade

de Maracanaú, na RMF. A Tabela 6 apresenta os dados de caracterização do ligante fornecidos pela empresa.

Tabela 6 – Caracterização do CAP 50/70

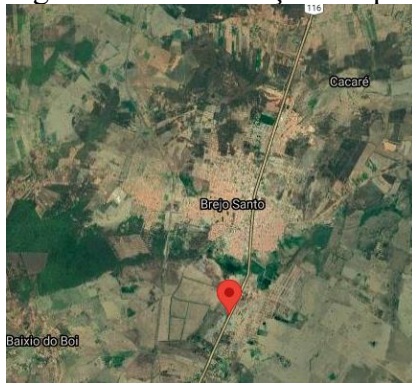
Características	Métodos	Limites	Resultados
Penetração (0,1 mm)	ASTM D 5	50 a 70	61
Ponto de amolecimento (°C)	ASTM D 36	46 mín.	48
Viscosidade rotacional 135 °C (cp)	ASTM D 4402	274 mín.	346
Viscosidade rotacional 150 °C (cp)	ASTM D 4402	112 mín.	175
Viscosidade rotacional 177 °C (cp)	ASTM D 4402	57 a 285	66
RTFOT - penetração retida (%)	ASTM D 5	55 mín.	70
RTFOT – aumento do ponto de amolecimento (°C)	ASTM D 36	8 máx.	4
RTFOT – ductilidade à 25 °C (cm)	ASTM D 113	20 mín.	> 150
RTFOT – variação de massa (%)	ASTM D 2872	± 0,50	0,00
Ductibilidade à 25 °C (cm)	ASTM D 113	60 mín.	> 150
Solubilidade no tricloroetileno (% massa)	ASTM D 2042	99,5 mín.	100,0
Índice de susceptibilidade térmica	—	-1,5 a 0,7	-1,3
Aquecimento à 177 °C	—	Não espuma	Não espuma

Fonte: Petrobras (2021)

4.1.3 Extração e processamento da seiva do aveloz

Para a obtenção da emulsão asfáltica, nomeada aqui de ETPav, é necessário primeiro a fabricação do bioligante a base da seiva do aveloz. A coleta da seiva foi realizada em uma propriedade localizada no quilômetro 504 da BR-116 (Latitude: -7.5078192, Longitude: -38.9879138), na cidade de Brejo Santo, que fica na região do Cariri, no sul do estado do Ceará. A localização e a vista frontal da propriedade são apresentadas na Figura 23. A coleta resultou em aproximadamente 2,7 litros de seiva.

Figura 23 – Localização e aspecto do ponto de coleta



a) Localização do ponto de coleta
Fonte: Google (2021)



b) Vista frontal da propriedade e da cerca de aveloz
Fonte: Google (2017)

A coleta da seiva se deu através do processo de sangria, realizando-se um corte no tronco da árvore por onde a seiva escorreu e foi coletada ao fim do rasgo, através de uma bica que despejava a seiva em um recipiente. O aspecto da planta aveloz e o processo de sangria no seu tronco são ilustrados na Figura 24.

Figura 24 – Aveloz e processo de coleta da seiva



a) Aveloz



b) Coleta da seiva através de sangria do tronco

Fonte: Elaborada pelo autor.

Além da seiva coletada, a Agropaulo Industrial S/A cedeu 250 ml de seiva de aveloz da produção própria, realizada na Fazenda Boticário, localizada na cidade de Maranguape, RMF. A seiva foi diluída em água, na proporção 1:1 para evitar sua solidificação.

A seiva passou por um processo de desidratação em estufa à temperatura de $55^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Gondim (2017) estabeleceu essa temperatura para evitar o superaquecimento do material durante o processo, inspirada pela recomendação de preparação de solos para aplicação em pavimentos. A seiva coletada pelo autor permaneceu na estufa por um período em torno de 60

horas, enquanto a seiva cedida pela Agropaulo Industrial S/A ficou na estufa por um período de 90 horas. Essa diferença é resultado da diluição em água da segunda amostra de seiva, requisitando mais tempo para desidratação do material. O aspecto da seiva antes e após a desidratação é retratado na Figura 25.

Figura 25 – Aspecto da seiva de aveloz antes e após a desidratação

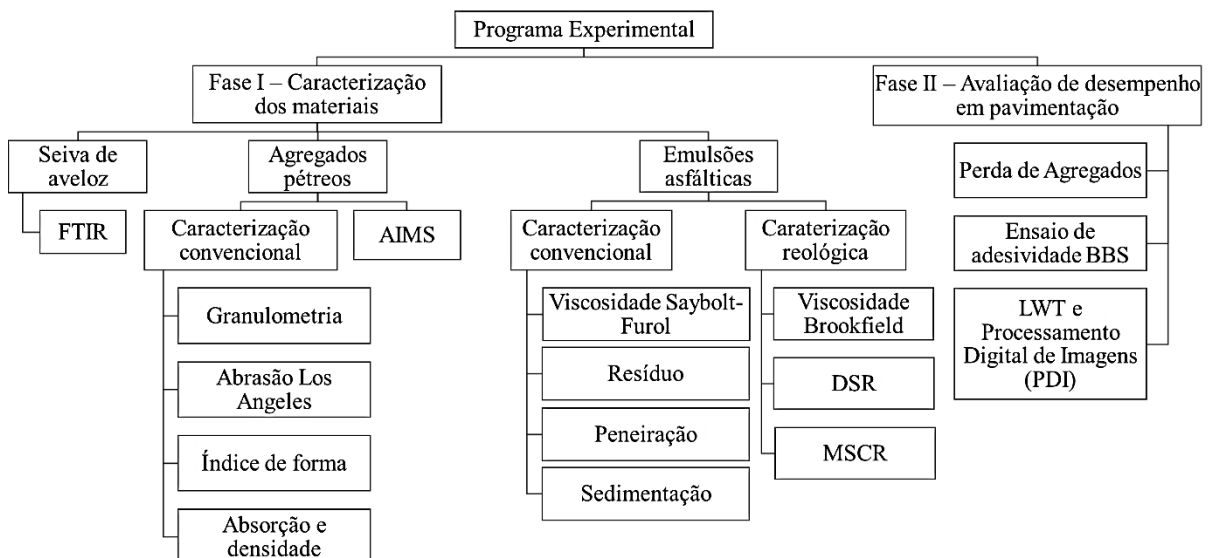


a) Material antes da secagem b) Material após a secagem
 Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Programa experimental

A fim de melhor orientar a pesquisa o programa experimental foi dividido em duas fases, sendo elas: (i) fase I de caracterização dos materiais a serem utilizados na pesquisa e (ii) fase II de avaliação de desempenho dos materiais estudados em serviços de pavimentação. O organograma descritivo do programa experimental está apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Organograma do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Fase I – Caracterização dos materiais

A primeira fase do programa experimental consistiu na caracterização dos materiais usados na pesquisa, sendo realizada uma caracterização química da seiva do aveloz, seguida pela caracterização do agregado e da caracterização dos ligantes asfálticos.

4.3.1 Caracterização da seiva

A fim de verificar se a seiva de aveloz de diferentes fontes apresentavam semelhança em termos estruturais por análise dos grupos funcionais, foi realizado o ensaio de Espectrometria da Região de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), obtidos por pastilha de KBr, no intervalo de 4.000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} .

4.3.2 Obtenção do bioligante

O processo de obtenção do bioligante se deu através do uso de um misturador de baixo cisalhamento, que conta com uma manta aquecedora e um controlador de temperatura, conforme Figura 27. O bioligante foi obtido usando uma taxa de 5%, em peso. As misturas foram realizadas em uma temperatura de $130 \pm 5^\circ\text{C}$, a uma rotação de 1.500 rpm, por uma hora. A seiva foi introduzida após a estabilização da temperatura e com o misturador em funcionamento.

Figura 27 – Misturador de baixo cisalhamento, manta aquecedora e controlador de temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com Gondim (2017), durante o início do processo de adição da seiva, a mistura apresenta uma expansão de aproximadamente 20%, devido a presença de água na seiva, mesmo após o processo de secagem em estufa. Acontece um borbulhamento, seguido de um aumento de volume e posterior estabilização e redução para o volume inicial, conforme Figura 28.

Figura 28 – Processo de expansão durante modificação do ligante



a) Adição da seiva ao ligante asfáltico

Fonte: Elaborada pelo autor.

b) Processo de expansão

c) Ligante estabilizado e retorno ao volume original

4.3.3 Obtenção da bioemulsão

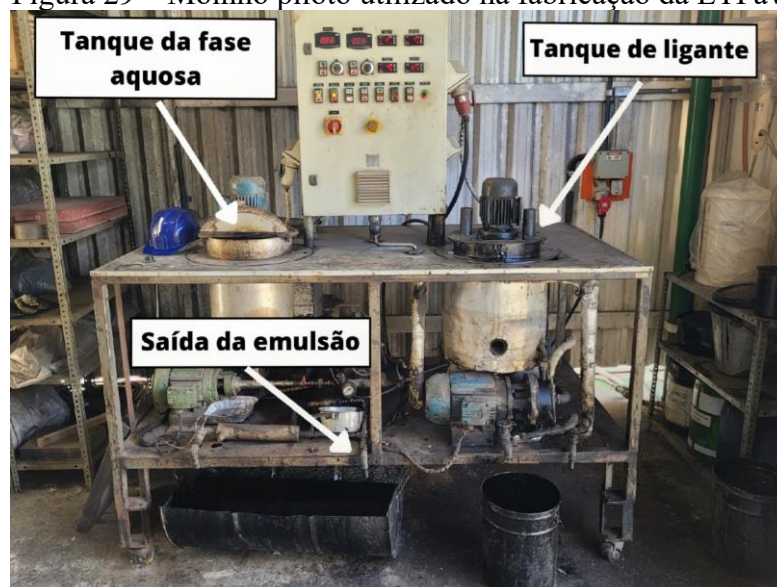
A emulsão com o bioligante, denominada ETPav, foi fabricada no moinho piloto da empresa Asfaltos Nordeste S.A, mostrado na Figura 29. Devido a incompatibilidade com a fase aquosa utilizada na emulsão RR-2C, relatada por Gondim (2017), resolveu-se utilizar da fase aquosa da emulsão RC1C-E, aplicada em microrrevestimentos asfálticos. Os componentes e proporções utilizadas são apresentados em Tabela 7.

Tabela 7 – Composição da ETPav

Componentes	Proporções
Água	37,2%
Ácido Clorídrico	1,3%
Emulsificante	1,5%
Ligante asfáltico com 5% de aveloz	60,0%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29 – Moinho piloto utilizado na fabricação da ETPav.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.4 Caracterização do agregado

A fim de se obter as características de forma do agregado utilizado, ele foi submetido aos ensaios convencionais de caracterização especificados pelo DNIT, além de ser feita a análise de sua forma e superfície através do AIMS.

4.3.4.1 Caracterização convencional

O DNIT indica em suas normas ensaios de caracterização dos agregados a fim de se verificar a sua adequabilidade para uso em pavimentação. Os ensaios realizados com o agregado empregado e suas respectivas normas são indicados na Tabela 8.

Tabela 8 – Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaios	Normas	Limites de aceitação
Agregados – análise granulométrica	DNER–ME 083/98	–
Agregados – determinação da abrasão Los Angeles	DNER–ME 035/98	< 40%
Agregado – determinação do índice de forma	DNER–ME 086/94	> 0,5
Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	DNER–ME 081/98	< 1%*

*Absorções maiores que 1% fazem com que sejam necessárias correções na taxa de ligante.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da análise granulométrica, são determinados os procedimentos e quantidades de amostras dos ensaios seguintes. Neste trabalho, optou-se por modificar a granulometria dos agregados, de modo que atendessem as dimensões da Classe I-II determinadas por DERT-CE (2000b), que é a especificação para TSD, vigente no estado no Ceará. Seguindo essa granulometria, foi utilizada a Faixa B para a execução do ensaio de abrasão Los Angeles.

4.3.4.2 Propriedades de forma dos agregados

A classificação do agregado utilizando o *Aggregate Imaging Measurement System2* (AIMS2) foi realizada com base na norma DNIT 432/2020 – ME que trata da determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI). Ibiapina (2018) estudou 20 agregados de diferentes localidades em 8 estados brasileiros (com tamanhos, composições mineralógicas, forma, angularidade e textura distintos) de forma a propor uma metodologia de classificação dos agregados, sendo essa a metodologia atualmente utilizada pela norma. A classificação é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação dos agregados através de parâmetros obtidos do AIMS

Propriedade	Valores-limite/Classificação				
Forma 2D	< 4,0	4,0 – 11,0	11,0 – 15,5	> 15,5	—
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	
Angularidade	< 1.260	1.260 – 4.080	4.080 – 7.180	> 7.180	—
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	
Esfericidade	< 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	> 0,9	—
	Achatado/ Angulado	Baixa Esfericidade	Esfericidade Moderada	Alta Esfericidade	
Textura Superficial	< 260	260 – 440	440 – 600	600 – 825	> 825
	Polido	Macio	Baixa Rugosidade	Rugosidade Moderada	Alta Rugosidade

Fonte: Ibiapina (2018)

A norma indica a quantidade de partículas a serem analisadas no equipamento de acordo com a fração em estudo. No caso desta pesquisa, as frações do agregado utilizadas na construção do TSP estão todas na faixa de 19 mm a 9,5 mm, sendo então realizadas as análises de angularidade, esfericidade e textura superficial. Para essa granulometria a norma indica o mínimo de 50 partículas a serem analisadas. A Figura 30 apresenta as partículas dispostas no equipamento para análise dos parâmetros de forma.

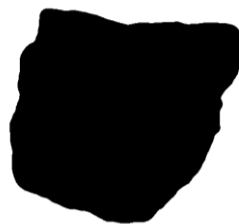
Figura 30 – Partículas para análise no AIMS2



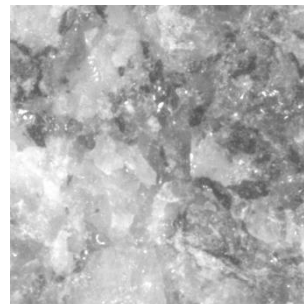
Fonte: Elaborada pelo autor.

O equipamento gira a bandeja posicionando cada partícula sob a luz para a captura das imagens através da lente. Além da captura das imagens, o equipamento utiliza a lente para capturar as dimensões de cada partícula para o cálculo da esfericidade. Na Figura 31 são apresentados exemplos de imagens capturadas pelo equipamento para o cálculo das propriedades de angularidade e textura superficial.

Figura 31 – Exemplos de imagens capturadas para o cálculo das propriedades de forma



a) Captura da angularidade



b) Captura da textura superficial

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.5 Caracterização das emulsões

A caracterização das emulsões foi realizada segundo procedimentos convencionais definidos pelo DNIT e através de ensaios reológicos definidos por NASCE (2017) para a obtenção do *Emulsion Performance Grade* (EPG).

4.3.5.1 Caracterização convencional

A Tabela 10 indica os ensaios previstos nas especificações das emulsões asfálticas para uso em pavimentação e os limites de aceitação, conforme DNIT (2013). Os ensaios foram realizados pela empresa Asfaltos Nordeste que cedeu o material convencional.

Tabela 10 – Ensaios de caracterização dos ligantes

Ensaio	Normas	Limites de aceitação
Emulsões asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt Furol	ABNT NBR 14491:2007	100 a 400
Ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas em estufa	ABNT NBR 14896:2019	mín. 67%
Emulsão asfáltica – determinação da peneiração	DNER–ME 005/94	máx. 0,1%
Emulsões asfálticas – determinação da sedimentação	DNER–ME 006/00	máx. 5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.5.2 Caracterização reológica

Para os ensaios reológicos, foram obtidos os resíduos das emulsões asfálticas, conforme adaptação do método B de AASHTO (2016). Devido a indisponibilidade de um aplicador de filme úmido, foi calculada a massa de emulsão necessária para atingir a espessura de 0,381 mm em uma forma de silicone. A emulsão foi espalhada com uma espátula, a fim de se obter um filme uniforme e levada a estufa por 6 horas a 60°C. O aspecto do material antes e após a evaporação em estufa é apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Obtenção do resíduo asfáltico



a) Emulsão antes do processo de evaporação

b) Resíduo da emulsão após o processo de evaporação

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos resíduos da emulsão e dos ligantes asfálticos coletados antes do processo de emulsificação, foram realizados os ensaios de *Frequency Sweep* (Varredura de Frequência – FS) e *Multiple Stress Creep Recovery* (Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas – MSCR) no reômetro de cisalhamento dinâmico AR-2000, mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Reômetro de cisalhamento dinâmico AR-2000



Fonte: Elaborada pelo autor.

No ensaio de FS os ligantes foram submetidos a varreduras de 1 a 160 rad/s com uma tensão oscilatória de cisalhamento de 120 Pa, às temperaturas do *Performance Grade* (Grau de Desempenho – PG): de 46°C a 88°C (altas temperaturas) e de 40°C a 4°C (temperaturas intermediárias). Para as altas temperaturas a amostra tem dimensões de 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura e para as temperaturas intermediárias tem dimensões de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

As curvas mestras do módulo complexo ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ) foram obtidas através dos deslocamentos das isotermas obtidas no ensaio por meio dos fatores de deslocamento (*shift factors*) obtidos pelas equações de Williams, Landel e Ferry, devido ao Princípio da Superposição Tempo-Temperatura. As curvas mestras foram obtidas por meio do *software Rheology Advantage Data Analysis®*.

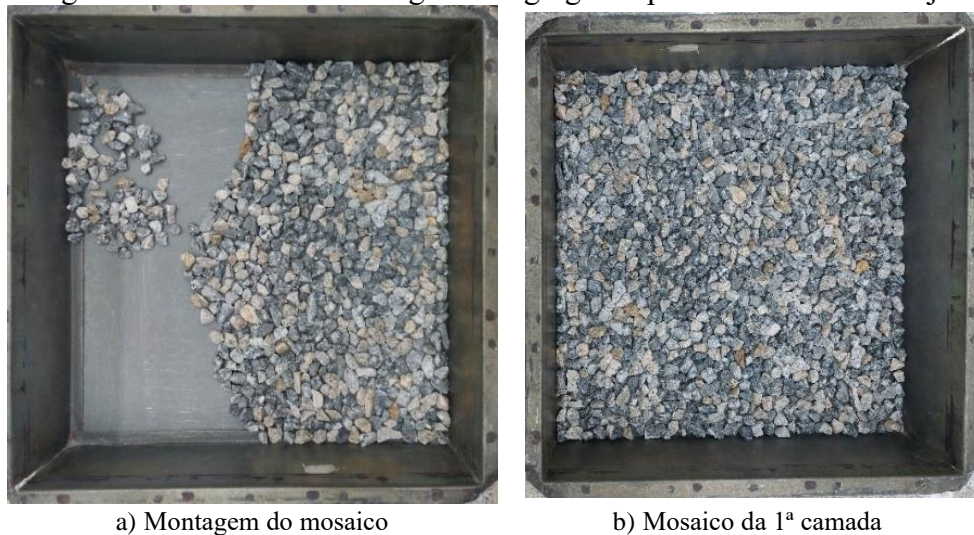
O ensaio de MSCR foi realizado na geometria de 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura, nas temperaturas de 46°C a 82°C. O ensaio consiste na aplicação de uma tensão (100 Pa e 3200 Pa) por 1 segundo, seguido da liberação para recuperação por 9 segundos durante vários ciclos, de modo a se medir as deformações causadas e as recuperações correspondentes.

4.4 Fase II – Avaliação de desempenho dos materiais em serviços de pavimentação

4.4.1 Ensaio de perda de agregados

Para o ensaio de perda de agregados no WTAT, foi realizado primeiramente o processo de dosagem do TSD. A taxa de agregados em massa foi obtida através do método da bandeja, conforme Figura 34. Os agregados foram dispostos em uma bandeja de 50 cm × 50 cm, formando um mosaico sem sobreposição. Foi realizada a pesagem da bandeja antes e após a montagem de mosaico, e o peso obtido foi dividido pela área da bandeja a fim de se obter a taxa de agregado (kg/m^2). O processo foi repetido então para a determinação da taxa de agregado da segunda camada do revestimento, onde o mosaico foi sobreposto a primeira camada.

Figura 34 – Processo de dosagem de agregados pelo método da bandeja



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a determinação da taxa volumétrica do agregado é realizado o ensaio de massa específica solta, onde se obtém a massa de agregado em um cilindro de volume conhecido (ver Figura 35). A taxa em volume (L/m^2) é obtida através da razão entre a taxa em massa (kg/m^2) e a massa específica solta (kg/m^3). A partir da soma da taxa volumétrica dos agregados das duas camadas foi obtido o valor da taxa de ligante a ser utilizada conforme Equação 3.8, para a RR-2C. Porém para a ETPav, por conter uma taxa de resíduo diferente foi utilizada a Equação 4.1.

$$T_{ETPav} = \frac{0,9 \times 1,05 \times T_{ag}}{0,62 \times 12} \quad (4.1)$$

Figura 35 – Determinação da massa específica solta



Fonte: Elaborada pelo autor.

A taxa de ligante encontrada é distribuída então em 40% para a primeira camada e 60% para a segunda camada. Da taxa de ligante da segunda camada foi retirado $0,5 \text{ l/m}^2$ para o banho diluído, sendo que esse ligante foi diluído em água na proporção de 1:1 para ser aplicado no revestimento com taxa de $1,00 \text{ L/m}^2$.

O ensaio de WTAT foi realizado conforme as adaptações de Loiola (2009) e Pereira (2013). A partir das taxas de agregados e ligante, foram obtidas as massas de material utilizadas para a área do aro usado no ensaio, que é de 28 cm de diâmetro. O conjunto utilizado consistiu em uma placa de compensado, uma manta asfáltica e um aro metálico. O peso do conjunto foi determinado antes da aplicação dos materiais, a fim de se realizar o controle das taxas aplicadas.

O ligante foi aquecido em uma manta aquecedora, conforme Figura 36a, até atingir a temperatura de 60°C para, e em seguida, foi aplicado sobre a manta asfáltica, controlando-se a taxa até se atingir a massa determinada. Após a aplicação do ligante, se iniciou imediatamente a distribuição dos agregados, de forma a construir um mosaico sem sobreposição. Em seguida, foi realizada a compactação do corpo de prova, com um rolo de metal preenchido com concreto de 55 kg, apresentado na Figura 36b, com 10 passadas de rolo. O processo foi então realizado mais uma vez para a segunda camada de ligante e agregado, e após a segunda compactação foi realizada a aplicação do banho diluído, com ajuda de um pincel. A moldagem de corpos de prova está exemplificada na Figura 37.

Figura 36 – Manta aquecedora e rolo compactador



a) Manta aquecedora



b) Rolo compactador

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – Processo de confecção das amostras para ensaio WTAT



a) Aplicação de 1ª camada de ligante

b) Aplicação de 1ª camada de agregado

c) Aplicação de 2ª camada de ligante

d) Aplicação de 2ª camada de agregado

Fonte: Elaborada pelo autor.

As amostras foram levadas então para cura em estufa por 24 horas a 60°C. Após esse período, as amostras foram retiradas para esfriarem até atingirem a temperatura ambiente, sendo então submersas por 10 minutos antes do ensaio de WTAT. As amostras foram submetidas ao processo de abrasão no equipamento por 5 minutos e, ao fim do ensaio, foram lavadas e levadas a estufa para secagem por 24 horas a 60°C e pesadas em seguida.

O cálculo da taxa de perda de agregados causada pelo WTAT foi realizado por meio da Equação 4.2.

$$D (\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde: D (%) é o desgaste sofrido no ensaio pela amostra;

P₁ é o peso da amostra antes do ensaio, descontado o peso da manta, aro e placa;

P_2 é o peso da amostra depois do ensaio, descontado o peso da manta, aro e placa.

4.4.2 Ensaio de adesividade

O ensaio de adesividade *Binder Bond Strength* (BBS) visa verificar a compatibilidade entre ligante asfáltico e agregado através da medição da força de tração necessária para descolar uma peça metálica (*stub*) presa ao substrato mineral pelo ligante. O ensaio é realizado de acordo com a norma AASHTO T 361, com a diferença que neste trabalho se utilizou o equipamento Positest, em vez do PATTI, conforme consta na Figura 38.

Figura 38 – Equipamento utilizado no ensaio BBS



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a realização do ensaio, rochas de mesma origem do agregado foram coletadas e cortadas em placas de faces paralelas. Essas placas foram, em seguida, limpas em um banho ultrassônico durante 1h. Em seguida, as placas também foram limpas com acetona e colocadas em estufa a 150°C junto com os *stubs*, para remoção de umidade residual. Os substratos e *stubs* foram então aquecidos a 150°C por 1 hora. Nesse ensaio, em função da incerteza do tempo de cura da ETPav, optou-se pelo uso dos resíduos das emulsões, método denominado *residue on rock* (ROR). Mesquita Júnior (2021) relatou que não existem diferenças significativas entre esse método e o método de cura na pedra (*curing on rock* – COR), onde é aplicada a emulsão fresca e aguardada a cura para realização do ensaio. O ligante foi aquecido e colocado em formas de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, cada amostra com massa de $0,4g \pm 0,05g$.

O ligante foi então desenformado, colocado no *stub* e pressionado contra a placa de agregado. Esse conjunto então sofreu 2 diferentes curas por 24 horas: uma seca e uma submersa em um banho à 40°C. A cura submersa foi iniciada 1h após a colocação do *stub*. Ao fim da cura foi realizado o arrancamento e a medição da tensão de arrancamento (*pull off tensile strength* –

POTS), sendo verificado também se o rompimento se deu no ligante (falha coesiva) ou na interface de contato (falha adesiva).

Para cada combinação de ligante e agregado foram feitas 6 amostras, sendo 3 para o condicionamento seco e 3 para o condicionamento submerso. O resultado é dado pela média dos 3 arrancamentos. Após encontrado a tensão de arrancamento de cada combinação em seu devido condicionamento foi calculada a chamada Razão de POTS (R_{POTS}), que é dada pela razão entre a tensão de arrancamento no condicionamento saturado ($POTS_{SATURADO}$) pela tensão encontrada no condicionamento seco ($POTS_{SECO}$). Segundo Aguiar-Moya (2015) essa razão deve apresentar valor superior a 70%. A Equação 4.3 indica como foi realizado esse cálculo.

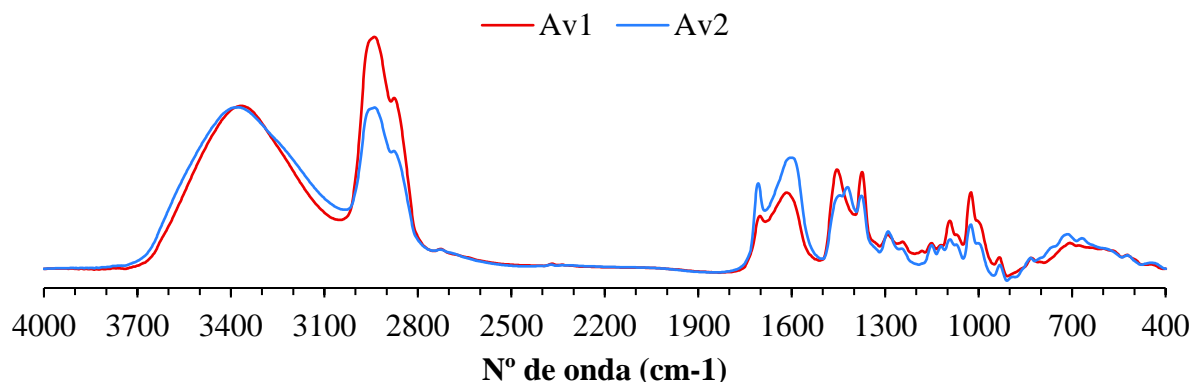
$$R_{POTS} = \frac{POTS_{SATURADO}}{POTS_{SECO}} \times 100 \quad (4.3)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da seiva de aveloz

Os espectros de Infravermelho das duas amostras da seiva de *Euphorbia Tirucalli*, obtidos por pastilha de KBr, no intervalo de 4.000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} , são apresentados na Figura 39. A amostra denominada Av1 é a amostra coletada na cidade de Brejo Santo, enquanto a amostra Av2 é a amostra coletada na cidade de Maranguape.

Figura 39 – Espectro de FTIR das amostras de seiva de *Euphorbia Tirucalli*



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 11 apresenta as atribuições de banda encontradas nas amostras. Essas obtiveram comportamento semelhante entre si e com a seiva analisada por Gondim (2017), com exceção da banda de 1.400 cm^{-1} , correspondente ao grupo funcional dos ácidos carboxílicos, que no estudo de Gondim (2017) não apresentou o vale entre as bandas de 1460 e 1378, que indicavam a existência de CH de cadeias alifáticas em sua amostra.

Tabela 11 – Atribuições das bandas do espectro de FTIR da seiva de *Euphorbia Tirucalli*

Nº de onda (cm^{-1})	Atribuição
3385	ν O–H
2929	ν C(sp ³)–H
2874	ν C(sp ³)–H
1721	ν C=O
1611	ν C=O de amidas terciária; δ O–H
1460	ν C–O
1378	ν C–O
1295	ν C–N de alifáticos
1157	ν C–O, álcoois terciários

1125	v C–O, de éteres alifáticos
1097	v C–O, álcoois secundários
1063	v C–O, álcoois primários
1028	v S=O
729	Deformação angular cadeia – (CH ₂) _n –

Fonte: Elaborada pelo autor.

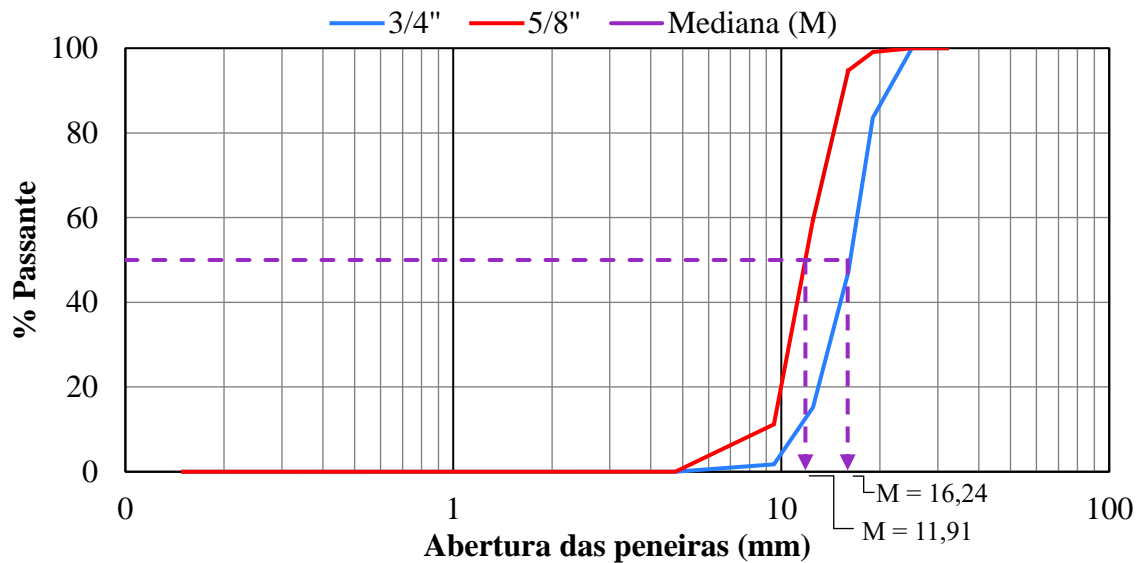
5.2 Caracterização dos agregados

5.2.1 Caracterização convencional

As curvas granulométricas das duas frações do agregado granítico são apresentadas na Figura 40. A partir dos valores obtidos, foram então calculados os parâmetros para a avaliação dos PUC, conforme as Equações 3.2, 3.3 e 3.4, apresentados na

Tabela 12.

Figura 40 – Granulometria dos agregados



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 12 – Parâmetros do PUC dos agregados

Parâmetros	3/4"	5/8"
M (mm)	16,24	11,91
0,7×M (mm)	11,37	8,34
1,4×M (mm)	22,74	16,67
P _{EM} (%)	10,12	8,46
P _{2EM} (%)	93,83	95,69

PUC	0,11	0,09
-----	------	------

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este trabalho, no entanto, foi usada a especificação vigente no estado do Ceará (DERT-CE, 2000b), sendo então utilizada a faixa de 19 mm – 16 mm para a primeira camada do TSD e a faixa de 16 mm – 10 mm para a segunda camada. A utilização dessas faixas garante a uniformidade do agregado, reduzindo uma variável que influencia os defeitos apresentados por esse tipo de revestimento.

Os resultados dos demais ensaios de caracterização convencionais são apresentados na Tabela 13. Ambas as frações atenderam aos critérios da especificação. Verifica-se que apesar de serem agregados de mesma origem, a fração de 5/8” apresentou resultados de abrasão e de absorção bem maiores que a fração de 3/4”. Os valores encontrados de densidade obtidos foram compatíveis com os esperados de agregados graníticos, conforme Brown *et al.* (2009) e semelhantes aos resultados encontrados em Pereira (2013), Silva (2018) e Brito (2019), que também estudaram materiais graníticos para TSP.

Tabela 13 – Resultados de caracterização dos agregados

Ensaio	Agregados	
	3/4”	5/8”
Abrasão Los Angeles	20%	32%
Densidade aparente	2,62 g/cm ³	2,60 g/cm ³
Absorção	0,52%	0,90%
Índice de forma	0,89	0,85

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.2 AIMS

Os resultados da classificação das propriedades de forma dos agregados no AIMS são obtidos através da média dos valores apresentados por cada partícula. A classificação de acordo com as frações que foram utilizadas para compor o TSD são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Classificação das propriedades de forma dos agregados

Propriedades	Medidas	Frações (mm)	
		19 – 16 (3/4”)	16 – 10 (5/8”)
Angularidade	N	100	188
	Média	2760,57	3000,43
	Desvio Padrão	575,00	713,62
	Classificação	Subarredondado	Subarredondado
Esfericidade	N	100	187
	Média	0,73	0,67
	Desvio Padrão	0,08	0,10

	Classificação	Esfericidade moderada	Baixa esfericidade
	N	100	188
Textura superficial	Média	348,56	352,09
	Desvio Padrão	138,48	152,37
	Classificação	Macio	Macio

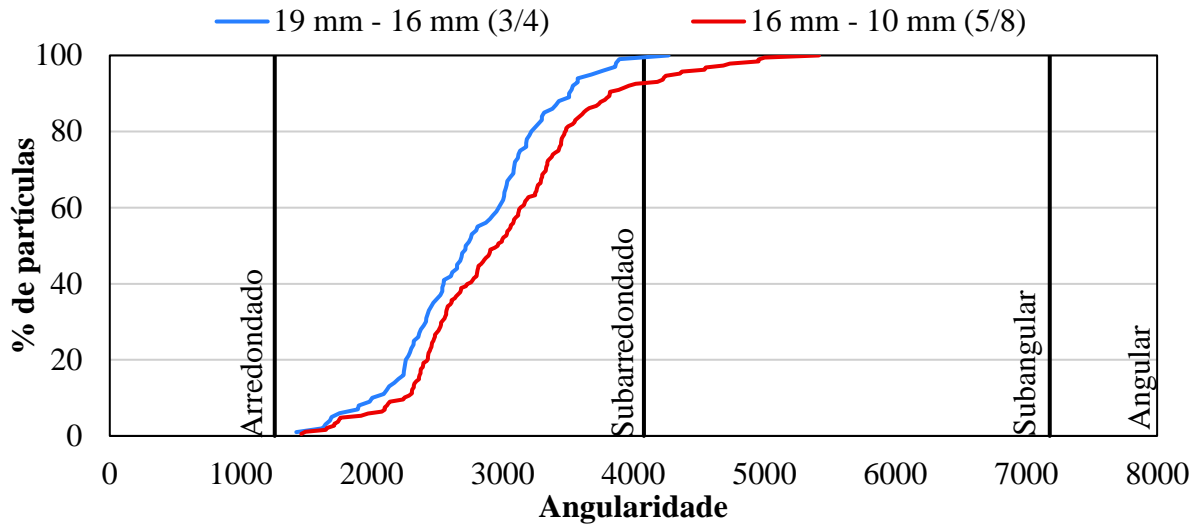
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados de esfericidade apresentados na Tabela 14 estão de acordo com os obtidos por Mesquita Júnior (2021), que estudou esse parâmetro e sua correlação com a uniformidade dos agregados graníticos utilizados em TSP. Em sua pesquisa, a modificação da faixa granulométrica para o enquadramento no parâmetro PUC fez com que a esfericidade da amostra aumentasse, saindo da baixa esfericidade para a classificação de esfericidade moderada. Foi encontrado ainda que quanto maior a esfericidade maior a taxa de agregados em TSP, e por consequência do método de dosagem, maior a taxa de ligantes. Tal fato é resultado de uma maior esfericidade permitir mais grãos em uma mesma área.

Para cada parâmetro, foi realizada ainda uma análise da distribuição das partículas, conforme a classificação em cada fração, a fim de verificar se a média dos valores é um valor representativo da amostra. Para tal, foram construídos gráficos com as frequências acumuladas de cada propriedade.

A Figura 41 apresenta a distribuição dos agregados quanto à angularidade. Observa-se que esses apresentaram distribuição semelhante de partículas nas classificações, com as duas frações com mais 90% das partículas classificadas como subarredondadas. Pela distribuição, observa-se que a fração de 16–10 mm obteve valores de angularidade maiores que a fração de 19–16 mm. Os resultados de textura superficial, com alta proporção de partículas subarredondadas também foi encontrada por Diógenes (2018). Uma das causas apontadas foi o tipo de britador utilizado, além da própria mineralogia da rocha matriz.

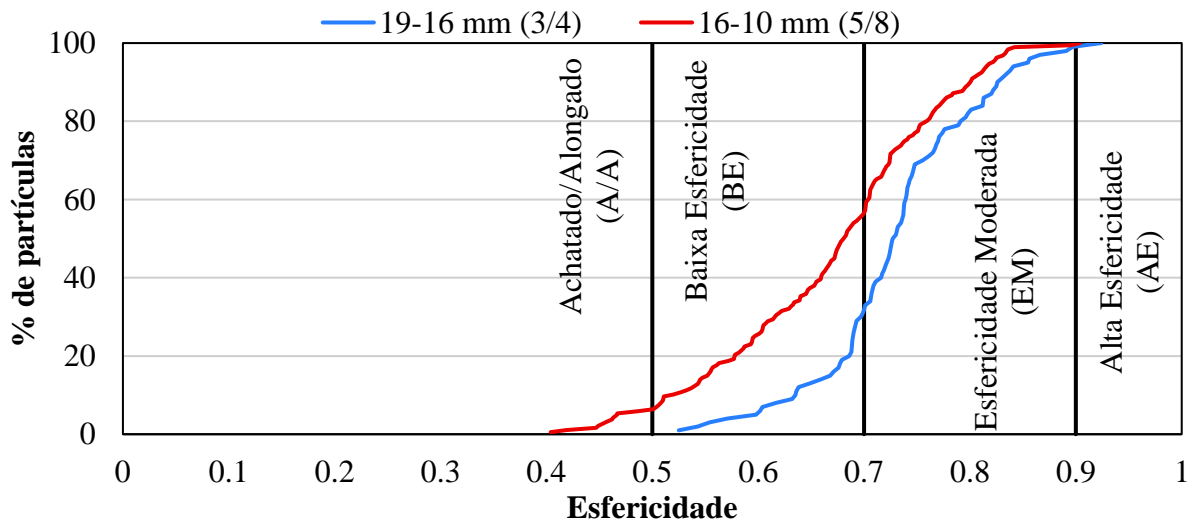
Figura 41 – Distribuição das partículas quanto à angularidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 42 apresenta a distribuição das partículas quanto à esfericidade. O agregado da fração de 19–16 mm apresentou esfericidade maior que a fração de 16–10 mm, que apresentou maior achatamento das partículas. Percebe-se que há uma diminuição na esfericidade na fração menor, que gerou uma mudança de classificação conforme a Tabela 14. Esse comportamento também foi identificado por Diógenes (2018) e atribuído ao uso do britador cônico, que tende a gerar partículas mais esféricas nas frações maiores.

Figura 42 – Distribuição das partículas quanto à esfericidade

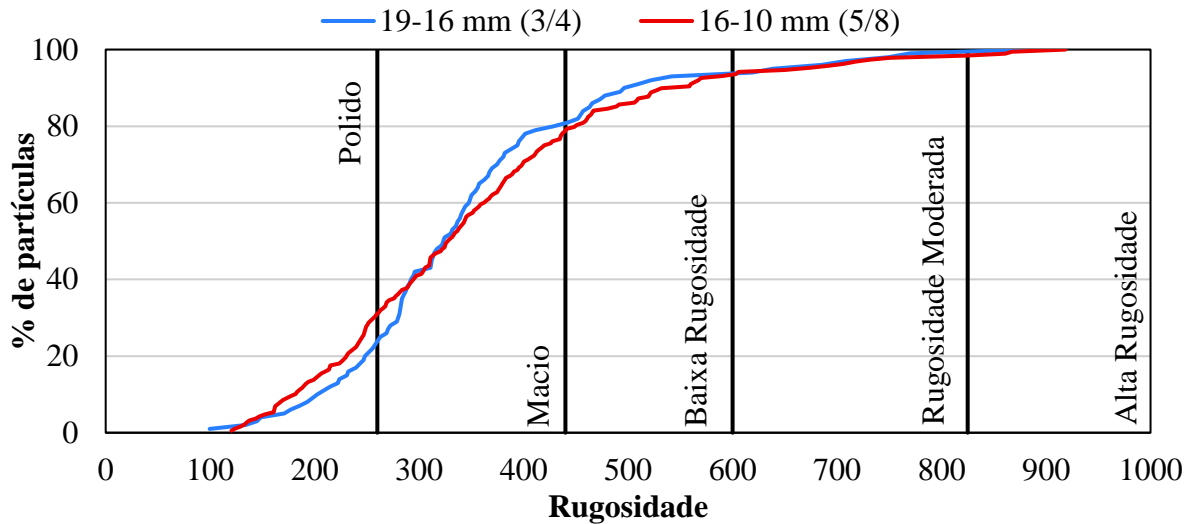


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 43 apresenta a distribuição dos agregados quanto à textura superficial, onde nota-se que as duas frações apresentaram distribuições quase iguais de valores. Verifica-se também a variabilidade de classificação das partículas ao longo da distribuição. No caso da fração de 16–10 mm, a classificação da textura superficial pela média indicou que o

agregado é classificado como macio, porém menos de 50% das suas partículas apresentam essa classificação.

Figura 43 – Distribuição das partículas quanto à textura superficial



Fonte: Elaborada pelo autor.

A textura superficial, segundo Diógenes (2018), pode ser associada com a resistência do material a quebra, não pela textura em si, mas pela composição mineralógica que causa a textura. Sendo assim, quanto maior a rugosidade encontrada, teoricamente mais resistente ao processo de quebra o agregado seria.

5.3 Caracterização das emulsões

5.3.1 Caracterização convencional

Os resultados dos ensaios de caracterização convencional estão na Tabela 15. Verifica-se que as duas emulsões apresentaram valores de resíduo abaixo do mínimo exigido pelo DNIT. A RR-2C é fabricada com essa proporção devido a normas no estado do Ceará que definem o mínimo dos resíduos como 67%. A ETPav apresentou o valor de 62%, pois a mesma foi fabricada conforme especificações da emulsão RC1C-E (aplicada para microrrevestimentos). Esse fato irá gerar um maior consumo de emulsão para obter a mesma taxa de ligante residual da RR-2C.

Tabela 15 – Resultados da caracterização convencional das emulsões.

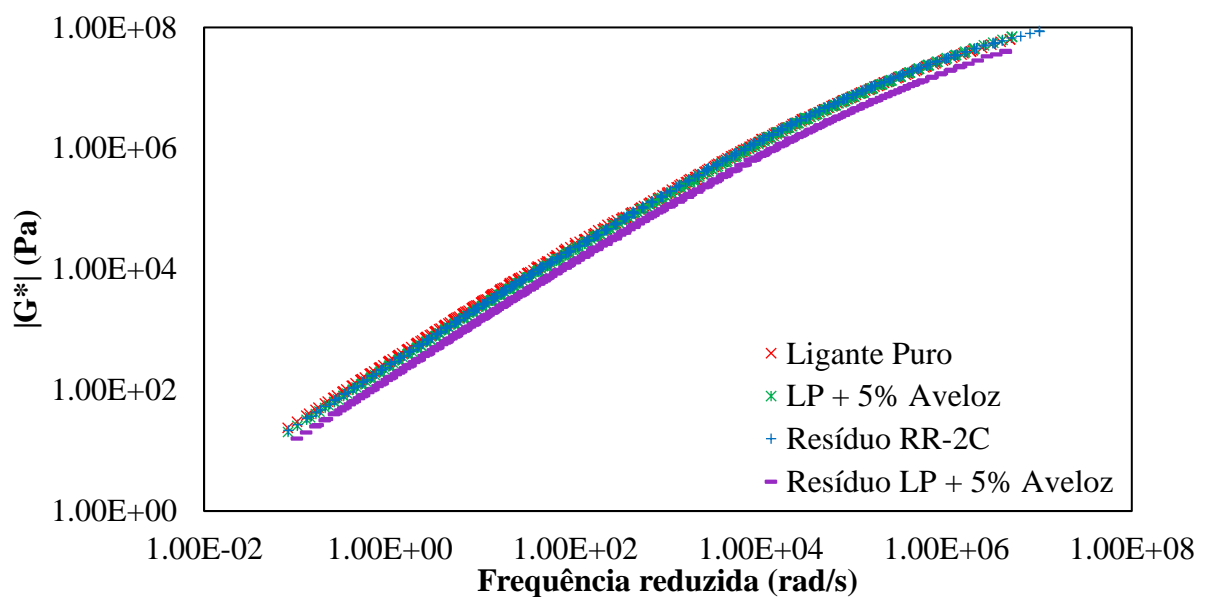
Ensaio	RR-2C	ETPav
Viscosidade Saybolt Furol	182	80
Resíduo	67%	62%
Peneiração	0,01%	0,1%
Sedimentação	–	1,5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3.2 Caracterização reológica

A partir do ensaio de *frequency sweep* realizado, foram montadas as curvas mestras de rigidez, conforme ilustrado na Figura 44. A temperatura de referência das curvas mestras escolhida foi de 64°C, temperatura imediatamente superior a de cura da emulsão usada nos ensaios.

Figura 44 – Curvas mestras do módulo complexo em função da frequência



Fonte: Elaborada pelo autor.

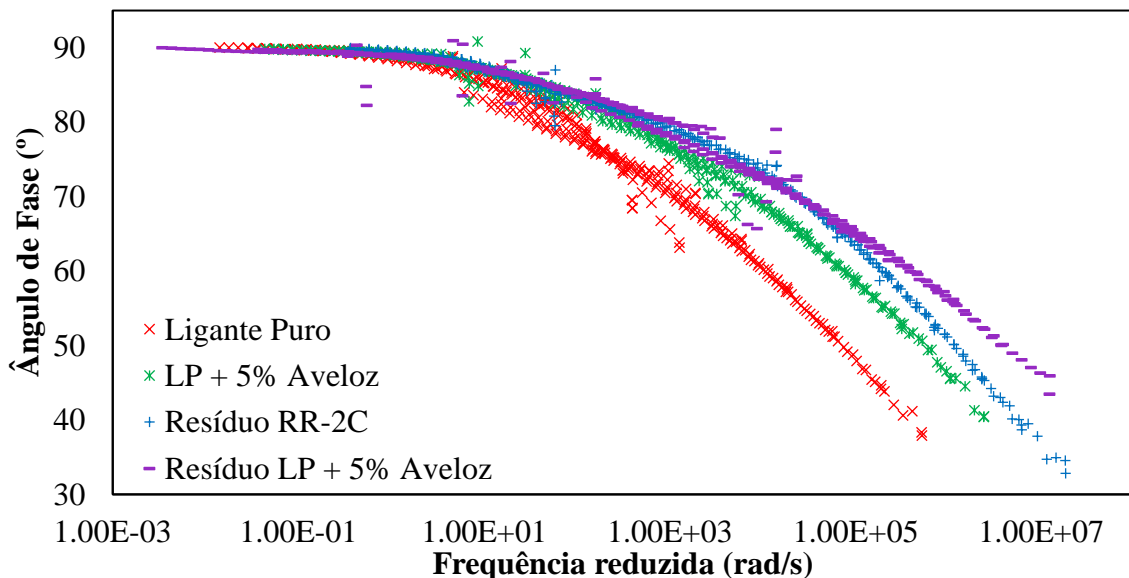
Quanto aos valores de rigidez, o ligante modificado obteve valores aproximadamente 9% menores em média, quando comparado ao ligante puro. Essa redução na rigidez com o processo de adição da seiva era esperada e foi relatada por Gondim (2017). A autora relatou uma redução de quase 32% no G^* para uma adição de 10% de seiva.

Quando se compara a rigidez dos resíduos de emulsão, a ETPav apresentou uma redução média de aproximadamente 151% quando comparada à RR-2C. O processo de

emulsificação mostrou um ganho de rigidez na emulsão convencional de 23,4%, em média. Na ETPav ocorreu o processo inverso, o resíduo de emulsão apresentou uma queda de rigidez em média de 78,9%. Essa diferença de variação entre os valores de rigidez pode ser explicada pelo processo de resistência ao envelhecimento que a seiva causa no ligante asfáltico, conforme indicado por Gondim (2017).

A Figura 45 apresenta as curvas mestras de ângulo de fase obtidas dos ligantes e resíduos de emulsão. Em baixas frequências os valores todos convergem para resultados muito próximos. Observa-se, porém, que depois os valores vão se afastando em direção aos resultados mais elevados de δ . As curvas dos ligantes quando comparados a seus resíduos de emulsão apresentam formas parecidas entre si. Os resíduos apresentaram um comportamento semelhante em uma faixa maior de frequência. O aumento no ângulo de fase também foi apresentado nos estudos de Gondim (2017). A autora indica que a adição da seiva torna o ligante menos elástico e com comportamento predominantemente viscoso.

Figura 45 – Curvas mestras do ângulo de fase em função da frequência



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a determinação das temperaturas inferiores do EPG, os valores de G^* foram verificados de acordo com os limites estabelecidos no protocolo, na temperatura de 4°C, conforme Tabela 16. Esse valor é relacionado com a perda de agregados precoce, decorrente da falha na coesão do ligante utilizado. De acordo com os valores de rigidez encontrados, os ângulos de fase que definem as temperaturas foram verificados, conforme Tabela 17. Os resultados são apresentados na Tabela 18. Dentro da isoterma da temperatura selecionada,

verificam-se os valores de rigidez que se encontram dentro dos limites especificados na Tabela 16. No valor de rigidez limite, verifica-se o ângulo de fase correspondente e a partir dele se analisa a temperatura correspondente na Tabela 17.

Tabela 16 – Limites inferiores de temperatura do EPG

Parâmetro de desempenho	Nível de tráfego	Limite de especificação do EPG
G* a 4°C no δ_c	Baixo	< 30 MPa
	Médio	< 20 MPa
	Alto	< 12 MPa

Fonte: NASCM (2017)

Tabela 17 – Ângulos de fase críticos para resíduos de ligantes para TSP

Temperatura inferior do EPG (°C)	δ_c (°)
-7	54
-13	51
-19	48
-25	45
-31	42
-37	39

Fonte: NASCM (2017)

Tabela 18 – Limites inferiores do EPG para as emulsões estudadas

Volume de tráfego	ETPav	RR-2C
Alto	-7 °C	-7 °C
Médio	-13 °C	-13 °C
Baixo	-19 °C	-19 °C

Fonte: Elaborada pelo autor.

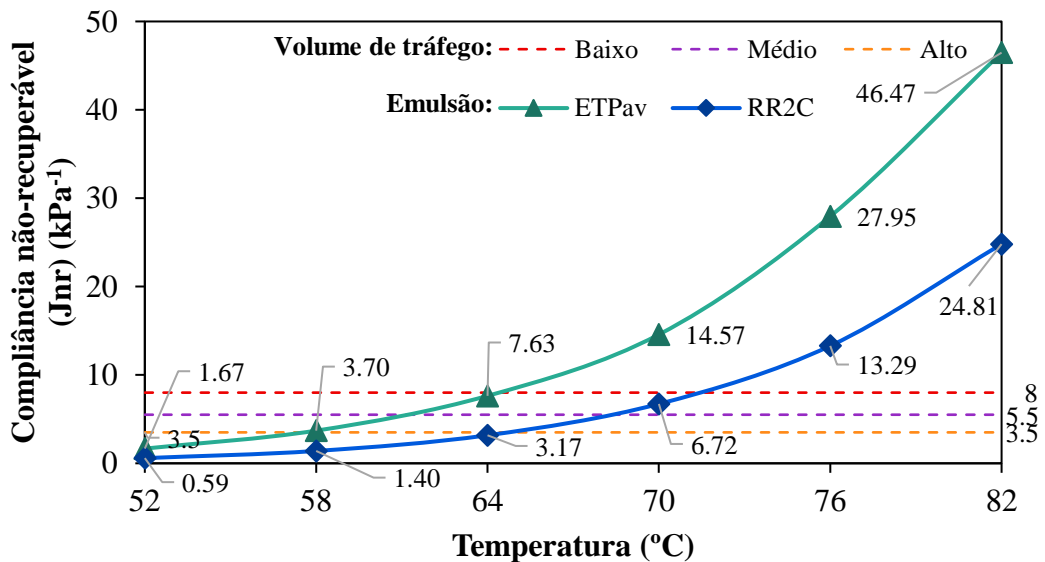
Os resultados de temperatura de serviço inferiores foram iguais para as duas emulsões. Isso se deu devido ao fato de apesar nas diferenças de rigidez, os ângulos de fase dos dois resíduos de emulsão apresentaram valores muito próximos. Esse comportamento mostra que a emulsão confeccionada ETPav tem possibilidade de uso em localidades frias e também possui a tendência de menor perda de agregado devido a fatores ligados ao ligante utilizado.

Os resultados do MSCR são apresentados na Figura 46. A adição da seiva aumentou os valores de compliância não-recuperável (Jnr), conforme já verificado em Gondim (2017). Esse comportamento também foi observado em outros trabalhos que estudaram a adição de biomateriais no ligante asfáltico, como Oldham e Fini (2020).

O protocolo EPG divide a aplicação da emulsão asfáltica em 3 níveis de tráfego ao qual o TSP será submetido. O protocolo EPG utiliza como resultados temperaturas 3 °C acima daquelas utilizadas no *Superpave*, devido a espessura do tratamento superficial, sendo considerada a temperatura da superfície do pavimento. Sendo assim, verificou-se que as duas emulsões podem ser utilizadas para tráfego pesado até a temperatura de 61°C. Para o tráfego médio, a ETPav mantém esse limite de temperatura enquanto a RR-2C pode ser utilizada até 67 °C. Em baixo volume de tráfego as temperaturas são de 67°C para a ETPav e 73°C para a RR-2C. Sendo assim, a ETPav acaba tendo limitação na aplicação em climas de temperatura elevada, como é o caso do estado do Ceará.

Os resultados de temperatura de aplicação foram semelhantes com os obtidos por Mesquita Júnior (2021). Esse autor indica, porém, que a temperatura do pavimento no nordeste brasileiro atinge temperaturas muito altas de modo que podem gerar um desempenho inferior no critério da exsudação, que trata o limite superior do EPG. O autor indica o uso de emulsões poliméricas que apresentaram desempenho no ensaio de MSCR. Vale ressaltar que o autor só realizou ensaios até a temperatura de 70°C, correspondente a 73°C no EPG, de modo que o desempenho das emulsões poliméricas pode ser aceitável em temperaturas ainda mais altas.

Figura 46 – Compliância não recuperável dos resíduos de emulsões



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os limites finais do EPG para as emulsões encontradas podem ser vistos na Tabela

Tabela 19 – Limites do EPG para as emulsões estudadas

Volume de tráfego	ETPav	RR-2C
Alto	55-7	67-7
Médio	61-13	67-13
Baixo	67-19	73-19

Fonte: Elaborada pelo autor.

As temperaturas de aplicação foram iguais em baixas temperaturas. Porém, nas altas temperaturas, a ETPav apresentou resultados inferiores à emulsão convencional. Esses resultados eram esperados, uma vez que no estudo de Gondim (2017) o ligante modificado por seiva de aveloz obteve resultados inferiores ao ligante convencional no ensaio de MSCR. Ainda assim, do ponto de vista prático, os resultados ficaram em faixas próximas de temperatura entre si, possibilitando o uso da ETPav em TSP, a depender a temperatura a qual o pavimento estará submetido.

5.4 Avaliação do desempenho

5.4.1 Ensaio de perda de agregados

5.4.1.1 Dosagem das amostras

As amostras foram dosadas conforme a seção 4.4.1 e os resultados das taxas teóricas de materiais podem ser encontradas na Tabela 20. As taxas teóricas de agregados são as mesmas, pois dependem apenas da granulometria utilizada. As taxas de ligantes dependem, além da taxa de agregados, da proporção de ligante asfáltico presente na emulsão utilizada. Sendo assim, as taxas da emulsão RR-2C foram mais baixas que as da ETPav, uma vez que a ETPav apresenta uma proporção de ligante menor em sua formulação, semelhante a RR-1C.

Tabela 20 – Taxas de materiais calculadas pelo método da SOP-CE

Emulsão	Taxa teórica de agregado da 1ª camada (kg/m²)	Taxa teórica de emulsão da 1ª camada (l/m²)	Taxa teórica de agregado da 2ª camada (kg/m²)	Taxa teórica de emulsão da 2ª camada (l/m²)	Taxa teórica do banho diluído (l/m²)
RR-2C	19,87	0,58	8,15	0,38	1,0
ETPav		0,63		0,45	

Fonte: Elaborada pelo autor.

As taxas reais aplicadas nas amostras de TSD podem ser consultadas na Tabela 21. Nota-se que as camadas de agregados não atingiram a taxa de agregados teórica, indicando uma superdosagem do método, enquanto as taxas de ligante resultaram em uma taxa superior a taxa calculada, especialmente a taxa de ligante da segunda camada. Silva (2018) encontrou resultados semelhantes, atribuindo a superdosagem dos agregados à aleatoriedade no tamanho e forma dos agregados no momento da formação do mosaico. Quanto ao problema da dosagem da emulsão, sugere-se o uso do método da bandeja aliado ao PDI para a determinação do volume de vazios e a partir do mesmo calcular-se uma taxa de emulsão otimizada (ADAMS, 2014; SILVA, 2018). Esse método não foi implementado neste estudo por limitação de equipamento.

Tabela 21 – Taxas de materiais aplicadas nas amostras de TSD

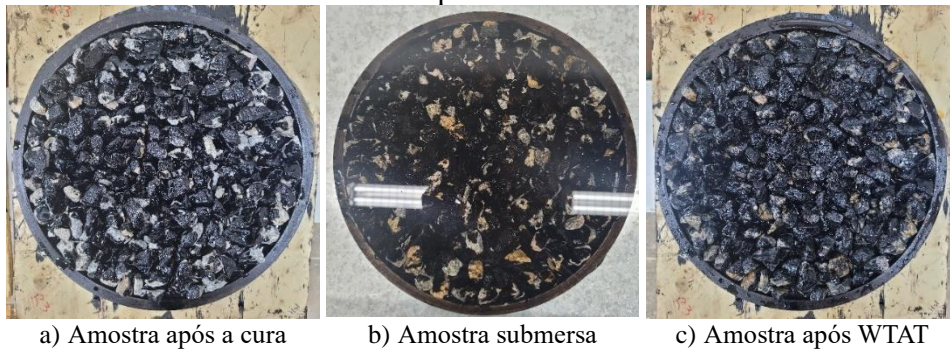
Amostra	Taxa efetiva de agregado da 1ª camada (kg/m ²)	Taxa efetiva de emulsão da 1ª camada (l/m ²)	Taxa efetiva de agregado da 2ª camada (kg/m ²)	Taxa efetiva de emulsão da 2ª camada (l/m ²)	Taxa efetiva do banho diluído (l/m ²)
RR1	17,99	0,63	6,41	0,78	1,13
RR2	18,14	0,66	5,63	0,75	1,18
RR3	18,47	0,76	7,24	0,83	1,11
RRMÉDIA	18,20	0,68	6,43	0,79	1,14
ET1	18,37	0,64	7,11	0,90	1,09
ET2	18,91	0,66	6,53	0,69	1,12
ET3	18,19	0,71	7,01	0,79	1,14
ETMÉDIA	18,49	0,67	6,88	0,79	1,12

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4.1.2 Desgaste das amostras com emulsão convencional

Um exemplo de amostra antes do ensaio, durante a submersão e após o WTAT pode ser observada na Figura 47. A amostra dessa figura foi moldada com a emulsão RR-2C e apresentou o comportamento esperado. Os resultados do WTAT para as amostras com RR-2C são apresentados na Tabela 22. Os resultados foram semelhantes ao encontrado por Pereira (2013) e Silva (2018) que utilizaram a RR-2C com agregados de origem mineralógica semelhantes. Na escala de desempenho proposta por Pereira (2013) a média de desgaste ficou classificada como “bom”, conforme Tabela 5.

Figura 47 – Amostra com RR-2C antes após o WTAT



a) Amostra após a cura

b) Amostra submersa

c) Amostra após WTAT

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22 – Desgaste para as amostras com RR-2C

Amostras	Desgaste	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
RR1	20,7%			
RR2	7,3%	15,1%	7,0%	46,2%
RR3	17,4%			

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4.1.3 Desgaste das amostras com a ETPav

As amostras construídas com ETPav, ao contrário das elaboradas com emulsão convencional, não apresentaram comportamento esperado com 24h de cura. A amostra apresentou desagregação quase completa, sendo observada cura incompleta da emulsão asfáltica. A amostra com cura de 24h pode ser vista na Figura 48. Sendo assim, decidiu-se aguardar 48h a partir do início da cura para o ensaio das amostras restantes, porém a segunda amostra também apresentou o mesmo comportamento da primeira.

Figura 48 – Amostra com cura incompleta no WTAT



a) Amostra antes do ensaio

b) Amostra com 3 min de ensaio

c) Amostra ao fim dos 5 min de ensaio

d) Água de submersão com a emulsão desprendida

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a terceira amostra foi decidido aguardar a estabilidade de massa para garantir a ruptura completa da emulsão. Essa estabilidade foi atingida no quinto dia de cura em estufa.

A amostra apresentou estabilidade de massa em 4 medições dentro de 24h, porém ao realizar o ensaio notou-se o mesmo aspecto da Figura 48d. Os desgastes das amostras e os tempos de cura associados a cada uma delas estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Desgaste para as amostras com ETPav

Amostra	Tempo de cura	Desgaste
ET1	24h	92,8%
ET2	48h	82,5%
ET3	120h	30,2%

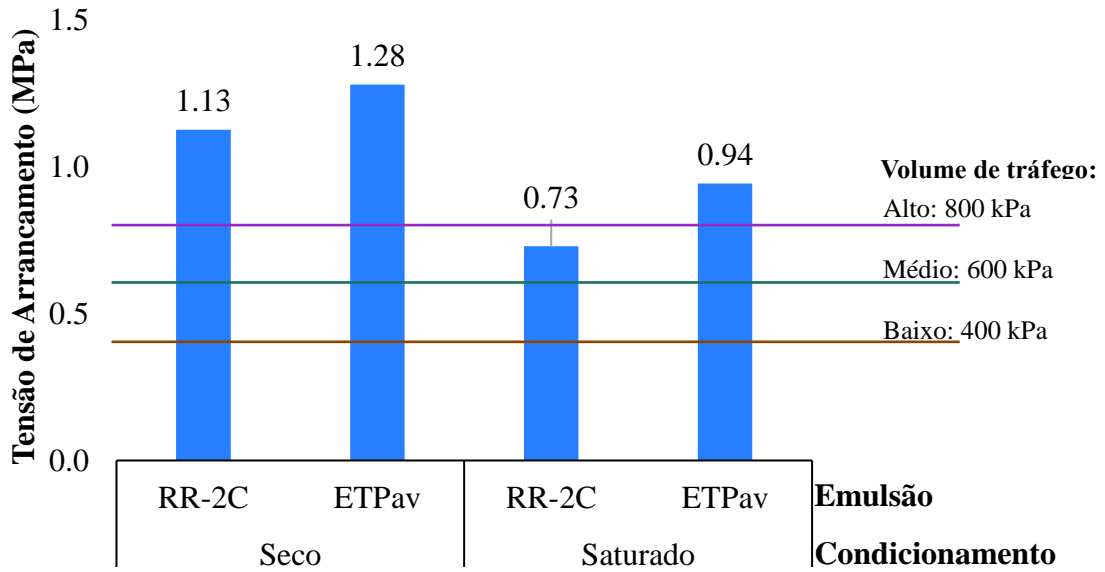
Fonte: Elaborada pelo autor.

O desgaste caiu com o tempo de cura, porém mesmo para 120h de cura apresentou um valor elevado, uma vez que a cura não tinha sido completa, apesar da constância de massa. Para aplicação em TSP, com esse tempo elevado de cura, deve-se estudar o uso de aceleradores de ruptura, para investigar o real comportamento de desgaste para esse tipo de serviço.

5.4.2 Ensaio de adesividade

Os resultados do ensaio de adesividade podem ser encontrados na Figura 49. A análise foi realizada considerando os limites de tensão de arrancamento sugeridos por Adams (2014), conforme apresentado na Figura 14, na seção 3.4. Esses limites consideram apenas os resultados do BBS referentes ao condicionamento seco e, nesse caso, as duas emulsões passaram no critério para todos os volumes de tráfego. Extrapolando o critério para o condicionamento úmido, a RR-2C fica limitada ao volume de tráfego médio enquanto a ETPav continua atendendo os valores exigidos para todos os 3 casos. Entretanto, vale notar que esses limites foram determinados com base na realidade norte-americana e não necessariamente refletem a situação brasileira, ou mais localmente, do estado do Ceará.

Figura 49 – Resultados do ensaio de adesividade BBS



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores encontrados foram semelhantes aos de Mesquita Júnior (2021) e, assim como no trabalho do mesmo, o mecanismo de falha de adesividade foi coesivo em todos os casos, independente do condicionamento. Um exemplo do mecanismo de falha encontrado nas amostras estudadas consta na Figura 50. A falha coesiva indica uma falha decorrente do próprio ligante e não da ligação entre o ligante e o agregado. Sendo assim, considerando esse ensaio há uma indicação de que esse agregado e os ligantes usados apresentam boa compatibilidade no quesito de adesividade.

Figura 50 – Exemplo de mecanismo de falha coesiva.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, foi realizado o cálculo do R_{POTS} conforme a Equação 4.3, de modo a verificar a influência da umidade na adesividade do material. Obteve-se que para a RR-2C essa relação foi de 65% e para a ETPav foi de 73%. Aguiar-Moya (2015) indica que esse valor deve

ser maior que 70%, logo apenas a ETPav atingiu o mínimo. Esse valor indica a queda na adesividade do ligante asfáltico ao agregado frente a presença de água.

Bezerra (2018) e Gondim (2017) estudaram a adesividade por meio do BBS do ligante modificado por seiva de aveloz na taxa de 10% e nesses estudos tanto o valor de POTS como de R_{POTS} do ligante modificado foi inferior ao ligante asfáltico convencional. É possível que o processo de emulsificação altere propriedades de adesividade dos ligantes, e por isso os resultados encontrados diferem dos deste estudo. Nos estudos dessas autoras também existe uma diferença no comportamento conforme a taxa de seiva aplicada, uma vez que as taxas de 20% e 30% apresentaram resultados superiores ao ligante asfáltico convencional.

6 . CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Quanto à caracterização e coleta da seiva de aveloz

A caracterização da seiva indicou que, apesar dos diferentes locais de coleta, foram apresentadas características químicas semelhantes. Os grupos funcionais mostrados no FTIR foram compatíveis entre si, com diferença de intensidade. Isso indica que apesar de coletas realizadas em locais diferentes, os materiais apresentam características e composição química semelhantes, fazendo com que se levante a possibilidade da homogeneização do material sem perda de resultados.

6.2 Quanto à caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados mostrou que os mesmos são adequados para uso em TSP. A fração menor apresentou maior desgaste, porém dentro dos limites estabelecidos em norma e a maior abrasão era esperada devido a diferença das resistências devido ao menor tamanho. As duas frações apresentaram índice de forma, de acordo com o ensaio tradicional, próximos de 1, o que indica uma boa cubicidade e se espera que tenham um melhor desempenho em campo.

Os parâmetros obtidos pelo AIMS, indicaram que os dois agregados apresentaram resultados semelhantes, com exceção da esfericidade, onde o agregado de 3/4" apresentou um cubicidade maior que o agregado de 5/8", ficando em outra classificação. Ressalte-se o fato da textura superficial dos dois agregados serem muito semelhantes, inclusive na distribuição das partículas, uma vez que esse parâmetro é especialmente importante para o TSP, já que garante que as partículas obtenham um travamento entre si.

Deve-se destacar o fato de a textura superficial ter apresentado resultados baixos, uma vez que pode indicar a facilidade de quebra do agregado. Esse fator é especialmente importante no ensaio de perda de agregados, uma vez que a quebra dos agregados pode gerar resultados imprecisos que mascarem o efeito do ligante no desempenho dos quesitos estudados.

6.3 Quanto à adequabilidade do uso da ETPav na área de pavimentação

Os primeiros ensaios para a determinação da adequabilidade do uso da ETPav em TSP, através do protocolo EPG, indicam que ela tem possibilidade técnica de ser utilizada,

porém deve-se atentar para as temperaturas máximas às quais o pavimento em questão será submetido. Os ensaios de MSCR indicaram uma menor recuperação elástica, quando comparada ao resíduo de RR-2C, o que causou a diminuição na temperatura superior de serviço e uma provável maior tendência à exsudação.

A formulação da ETPav fez com que a mesma obtivesse uma menor taxa de ligante asfáltico, fazendo com que seja necessária uma quantidade maior de emulsão aplicada do que a RR-2C. Observe-se que esse fato fez com que a dosagem dessa emulsão fosse obtida por equações diferentes, que levassem em conta o resíduo da mesma.

O ensaio de WTAT não foi conclusivo quanto à perda de agregados causada pela parcela da emulsão, uma vez que a ETPav não apresentou um processo de cura completo. Esse ensaio indicou que a ETPav necessitaria de um possível aditivo acelerador de ruptura para ser aplicada em campo, bem como da análise de custo-benefício da implementação da seiva de aveloz em TSP. Acredita-se que a emulsão ETPav possa também ser estudada para uso em microrrevestimentos asfálticos que contam com aditivos para controle de cura.

Quanto ao ensaio de adesividade BBS, ambas as emulsões (RR-2C e ETPav) apresentaram resultados de tensão de arrancamentos satisfatórios e o mecanismo de falha do ensaio indica uma boa compatibilidade com o agregado. Entretanto, quando se compara os valores do condicionamento saturado com o seco, observa-se que a emulsão convencional obteve uma relação menor que o indicado como ideal, enquanto a ETPav obteve uma R_{POTS} satisfatória.

6.4 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestões de trabalhos futuros, tendo em vista a continuação dos estudos de biomateriais na pavimentação e pesquisas sobre dosagem e desempenho de TSP, recomenda-se:

- a) Estudar o uso de aditivos aceleradores de ruptura na ETPav para seu uso em TSP;
- b) Investigar o fenômeno da exsudação para o caso da emulsão ETPav;
- c) Estudar a possibilidade de aplicação da ETPav em microrrevestimentos asfálticos;
- d) Estudar a adesividade das emulsões asfálticas de modo a comparar as mesmas com as dos ligantes utilizados em sua formulação, a fim de verificar se há alterações significativas causadas pelo processo de emulsificação;
- e) Analisar a solubilização da seiva de aveloz com investigação dos compostos residuais;

f) Buscar alternativas ao método de dosagem de ligante para TSP, de modo a evitar dosagens insuficientes em tratamentos de múltiplas camadas;

g) Investigar o uso de diferentes emulsificantes para elaboração de uma emulsão asfáltica à base da seiva do aveloz com menor tempo de ruptura;

h) Investigar diferentes processos de adição da seiva do aveloz ao ligante asfáltico, com diferentes tempos de mistura.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, J. M. **Development of a Performance-Based Mix Design and Performance-Related Specification for Chip Seal Surface Treatments**. 206 f. Tese (Doutorado), North Carolina State University, Raleigh, 2014.
- ADAMS, J.; CASTORENA, C.; IM, J. H.; ILIAS, M.; KIM, Y. R. Addressing Raveling Resistance in Chip Seal Specifications. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2612, n. 1, p. 39-46, jan. 2017. DOI: 10.3141/2612-05.
- AHMAD, M. F.; AHMED ZAIDI, S. B.; FAREED, A.; AHMAD, N.; HAFEEZ, I. Assessment of sugar cane bagasse bio-oil as an environmental friendly alternative for pavement engineering applications. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], p. 1–12, 2021. DOI: 10.1080/10298436.2020.1870114
- AKTAŞ, B.; KARAŞAHIN, M.; SALTAN, M.; GÜRER, C.; UZ, V. E.. Effect of aggregate surface properties on chip seal retention performance. **Construction And Building Materials**, v. 44, p. 639-644, jul. 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.060.
- AL-OMARI, A. A.; KHEDAYWI, T. S.; KHASAWNEH, M. A. Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 68–76, 2018.
- ALAMAWI, M. Y.; KHAIRUDDIN, F. H.; YUSOFF, N. I. Md.; BADRI, K.; CEYLAN, H. Investigation on physical, thermal and chemical properties of palm kernel oil polyol bio-based binder as a replacement for bituminous binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], n. 204, p. 122–131, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.144
- ALATTIEH, S. A.; AL-KHATEEB, G. G.; ZEIADA, W.; SHANABLEH, A. Performance assessment of bio-modified asphalt binder using extracted bio oil from date seeds waste. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 1260–1270, 2020.
- ALMEIDA, F. D. de. **Avaliação da penetração, coesão, aderência e desgaste superficial de ligantes alternativos e comerciais para aplicação na imprimação betuminosa de rodovias**. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- ALVAREZ, A. E.; ESPINOSA, L. V.; PEREA, A. M.; REYES, O. J.; PABA, I. J. Adhesion Quality of Chip Seals: comparing and correlating the plate-stripping test, boiling-water test, and energy parameters from surface free energy. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, v. 31, n. 3, p. 04018401, mar. 2019. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002603.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAYS AND TRANSPORTATIONS OFFICIALS. **R 78: Standard Practice for Recovering Residue from Emulsified Asphalt Using Low-Temperature Evaporative Techniques**. Washington, DC, 2016. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS (ABEDA). Aditivos orgânicos melhoradores de adesividade - AMO. Usos e benefícios. Informativo técnico n. 1. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14746: Microrrevestimentos a frio e lama asfáltica — determinação de perda por abrasão úmida (WTAT). Rio de Janeiro, 2014.

AUDO, M.; CHAILLEUX, E.; BUJOLI, B.; QUEFFÉLEC, C.; LEGRAND, J.; LÉPINE, O. Alternative Binder from Microalgae. **Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements – Papers from a Workshop**, Transportation Research Circular, Number E–C165. Washington D.C., 2012 b, p. 7-14.

BARZEGARI, S.; SOLAIMANIAN, M. Rheological behavior of bio-asphalts and effect of rejuvenators. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 251, p. 118137, 2020. Disponível em: Acesso em: 9 out. 2021.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Abeda, 2008. 504 p.

CAO, W.; WANG, C. Fatigue performance characterization and prediction of asphalt binders using the linear amplitude sweep based viscoelastic continuum damage approach. **International Journal of Fatigue**, [s. l.], v. 119, p. 112–125, 2019.

CAO, W.; WANG, Y.; WANG, C. Fatigue characterization of bio-modified asphalt binders under various laboratory aging conditions. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 208, p. 686–696, 2019.

CHATURABONG, P. **Development of the Loaded Wheel Tracking Test (LWT) for Evaluating Bleeding In Chip Seals and Relationship to Emulsion Residue Rheology**. 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Civil And Environmental Engineering, University Of Wisconsin–Madison, Madison, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Rodovias 2021**. Brasília: Confederação Nacional dos Transportes, 2021.

CUADRI, A. A.; GARCÍA-MORALES, M.; NAVARRO, F. J.; PARTAL, P. Processing of bitumens modified by a bio-oil-derived polyurethane. **Fuel**, [s. l.], v. 118, p. 83–90, 2014.

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES, RODOVIAS E TRANSPORTES. **DERT-ES-P 10/00**: Tratamento superficial simples. Fortaleza, 2000.

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES, RODOVIAS E TRANSPORTES. **DERT-ES-P 11/00**: Tratamento superficial duplo. Fortaleza, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 146/2012 – ES**: Pavimentação asfáltica - tratamento superficial simples - especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 147/2012 – ES**: Pavimentação asfáltica - tratamento superficial duplo - especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 148/2012 – ES**: Pavimentação asfáltica - tratamento superficial triplo - especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 165/2013 – EM**: Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 432/2020 – ME**: Agregados - Determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI) - Método de ensaio. Brasília, 2020.

DIÓGENES, L. M.. **Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem**. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

DONG, Z.; YANG, C.; LUAN, H.; ZHOU, T.; WANG, P. Chemical characteristics of bio-asphalt and its rheological properties after CR/SBS composite modification. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 200, p. 46–54, 2019.

ESPINOSA, L. V.; GADLER, F.; MOTA, R. V.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L. L. B. Comparison of the rheological and the thermal behaviour of a neat asphalt binder and a wood-based binder for pavement surface layer. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 22, n. sup1, p. S702–S717, 2021.

FINI, E. H.; HOSSEINNEZHAD, S.; OLDHAM, D.; MCLAUGHLIN, Z.; ALAVI, Z.; HARVEY, J. Bio-modification of rubberised asphalt binder to enhance its performance. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 10, p. 1216–1225, 2017.

GONDIM, L. M.. **Investigação sobre a formulação de um bioligante à base da seiva de *Euphorbia Tirucalli* para emprego em pavimentação**. 214 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

GOOGLE. **BR-116, km 504, CE**. Street View. 2017. Disponível em: <https://goo.gl/maps/23rcBLHAYjZoctQu9>. Acesso em: 06 jul. 2021.

GOOGLE. **BR-116, km 504, CE** Vista de satélite. 2021. Disponível em: <https://goo.gl/maps/afKUVAAhm3mJeHf1A>. Acesso em: 06 jul. 2021.

HE, M.; TU, C.; CAO, D. W.; CHEN, Y. J. Comparative analysis of bio-binder properties derived from different sources. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 792–800, 2017.

IBIAPINA, D. S.. **Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens para a seleção de materiais brasileiros**. 176 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

INGRASSIA, L. P.; LU, X.; FERROTTI, G.; CANESTRARI, F.. Renewable materials in bituminous binders and mixtures: speculative pretext or reliable opportunity?. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 144, p. 209-222, maio 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.01.034.

JOHNSTON, J. B.; KING, G.. Using Polymer Modified Asphalt Emulsions in Surface Treatments A Federal Lands Highway Interim Report. **Federal Highway Administration**, 2008.

KUMAR, A.; CHOUDHARY, R.; NARZARI, R.; KATAKI, R.; SHUKLA, S. K. Evaluation of bio-asphalt binders modified with biochar: a pyrolysis by-product of Mesua ferrea seed cover waste. **Cogent Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1548534, 2018.

LARSEN, J.. **Tratamento Superficial na Conservação e Construção de Rodovias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 1985.

LEE, J. S.; KIM, Y. R.. Understanding the Effects of Aggregate and Emulsion Application Rates on Performance of Asphalt Surface Treatments. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2044, n. 1, p. 71-78, jan. 2008. DOI: 10.3141/2044-08.

LEE, J. S.; KIM, Y. R.. Performance-Based Uniformity Coefficient of Chip Seal Aggregate. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2108, n. 1, p. 53-60, jan. 2009. DOI: 10.3141/2108-06.

LOIOLA, P. R. R.. **Estudo de agregados e ligantes alternativos para emprego em tratamentos superficiais de rodovias**. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

LEI, Y.; WANG, H.; CHEN, X.; YANG, X.; YOU, Z.; DONG, S.; GAO, J. Shear property, high-temperature rheological performance and low-temperature flexibility of asphalt mastics modified with bio-oil. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 174, p. 30–37, 2018.

LEI, Y.; WANG, H.; FINI, E. H.; YOU, Z.; YANG, X.; GAO, J.; DONG, S.; JIANG, G. Evaluation of the effect of bio-oil on the high-temperature performance of rubber modified asphalt. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 191, p. 692–701, 2018b.

LIU, Q.; WANG, C.; FAN, Z.; SHI, S.; ZHANG, Z.; OESER, M. Feasibility analysis of bio-binder as non-petroleum alternative for bituminous materials. **Materials Research Express**, [s. l.], v. 6, n. 12, p. 125115, 2020.

LUO, W.; ZHANG, Y.; CONG, P. Investigation on physical and high temperature rheology properties of asphalt binder adding waste oil and polymers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 144, p. 13–24, 2017.

LV, S.; XIA, C.; YANG, Q.; GUO, S.; YOU, L.; GUO, Y.; ZHENG, J. Improvements on high-temperature stability, rheology, and stiffness of asphalt binder modified with waste crayfish shell powder. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 264, p. 121745, 2020.

MA, J.; SUN, G.; SUN, D.; ZHANG, Y.; CANNONE FALCHETTO, A.; LU, T.; HU, M.; YUAN, Y. Rubber asphalt modified with waste cooking oil residue: Optimized preparation, rheological property, storage stability and aging characteristic. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 258, p. 120372, 2020.

MAHSSIN, Z. Y.; ZAINOL, M. M.; HASSAN, N. A.; YAACOB, H.; PUTEH, M. H.; SAIDINA AMIN, N. A. Hydrothermal liquefaction bioproduct of food waste conversion as an alternative composite of asphalt binder. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 282, p. 125422, 2021.

MANKE, N. D.; WILLIAMS, R. C.; SOTOODEH-NIA, Z.; COCHRAN, E. W.; POROT, L.; CHAILLEUX, E.; POUGET, S.; OLARD, F.; BARCO CARRION, A. J. D.; PLANCHE, J.-P.; LO PRESTI, D. Performance of a sustainable asphalt mix incorporating high RAP content and novel bio-derived binder. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 812–834, 2019.

MESQUITA JÚNIOR, G. S.. **Evaluation of criteria for selection of materials for surface treatment based on performance**. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

METWALLY, M, A. R. M.; WILLIAMS, R. C. **Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements**. Final Report IHRB Project TR-594, In Trans Project 08-133. Iowa State University, Ames, Iowa, United States of America, 2010.

MILLS-BEALE, J.; YOU, Z.; FINI, E.; ZADA, B.; LEE, C. H.; YAP, Y. K. Aging Influence on Rheology Properties of Petroleum-Based Asphalt Modified with Biobinder. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 358–366, 2014.

MOGAWER, W. S.; FINI, E. H.; AUSTERMAN, A. J.; BOOSHEHRAN, A.; ZADA, B. Performance characteristics of high reclaimed asphalt pavement containing bio-modifier. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 753–767, 2015.

NIU, D.; XIE, X.; ZHANG, Z.; NIU, Y.; YANG, Z. Influence of binary waste mixtures on road performance of asphalt and asphalt mixture. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 298, p. 126842, 2021.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE. **Performance-Related Specifications for Emulsified Asphaltic Binders Used in Preservation Surface Treatments**. Washington, DC: The National Academies Press, 2017. 114 p. DOI: 10.17226/24694.

OLDHAM, D. J.; FINI, E. H. A bottom-up approach to study the moisture susceptibility of bio-modified asphalt. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 265, p. 120289, 2020.

PERALTA, J.; SILVA, H.M.R.D.; WILLIAMS, R.C.; ROVER, M.; MACHADO, A.V.A. Development of an Innovative Bio-Binder Using Asphalt-Rubber Technology. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v.6, n. 4, p 477-456, 2013.

PERALTA, J.; WILLIAMS, R.C.; ROVER, M.; SILVA, H.M.R.D. Development of Rubber-Modified Fractionated Bio-Oil for Use as Noncrude Petroleum Binder in Flexible Pavements. **Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements – Papers from a Workshop**, Transportation Research Circular, Number E-C165. Washington D.C., 2012. p. 23-36.

PEREIRA, S. L. de O. **Avaliação de Tratamentos Superficiais de Rodovias Através de Análise de Laboratório**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

PEREIRA, S. L. de O. **Avaliação dos tratamentos superficiais simples, duplo e triplo de rodovias através do emprego de diferentes agregados da região metropolitana de Fortaleza**. 211 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação asfáltica: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 288 p.

RAOUF, M. A.; WILLIAMS, R. C. Temperature and Shear Susceptibility of a Nonpetroleum Binder as a Pavement Material. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s. l.], v. 2180, n. 1, p. 9–18, 2010.

SALAZAR-CRUZ, B. A.; ZAPIEN-CASTILLO, S.; HERNÁNDEZ-ZAMORA, G.; RIVERA-ARMENTA, J. L. Investigation of the performance of asphalt binder modified by sargassum. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 271, p. 121876, 2021.

SAMIEADEL, A.; SCHIMMEL, K.; FINI, E. H. Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 191–200, 2017.

SILVA, R. C. da. **Introdução de um novo coeficiente para análise de desempenho dos tratamentos superficiais a partir dos estudos desenvolvidos nos Estados do Ceará/Brasil e Carolina do Norte**. 2016. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SILVA, R. C. da. **Avaliação da dosagem de tratamentos superficiais por penetração de rodovias baseada na exsudação e na perda de agregados**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SUN, D.; LU, T.; XIAO, F.; ZHU, X.; SUN, G. Formulation and aging resistance of modified bio-asphalt containing high percentage of waste cooking oil residues. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 161, p. 1203–1214, 2017.

SUN, D.; SUN, G.; DU, Y.; ZHU, X.; LU, T.; PANG, Q.; SHI, S.; DAI, Z. Evaluation of optimized bio-asphalt containing high content waste cooking oil residues. **Fuel**, [s. l.], v. 202, p. 529–540, 2017b.

SUN, Z.; YI, J.; CHEN, Z.; XIE, S.; XU, M.; FENG, D. Chemical and rheological properties of polymer modified bitumen incorporating bio-oil derived from waste cooking oil. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 52, n. 5, 2019.

TERZI, S.; SALTAN, M.; ARMAGAN, K.; KURTMAN, A. K.; KARAHANCER, S.; ERISKIN, E.; UZ, V. E. Bitumen expanding using bio-oil product of rose pulp's pyrolysis process. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 249, p. 118721, 2020.

UCHOA, A. F. J.; ROCHA, W. S.; FEITOSA, J. P. M.; BRITO, D. H. A.; GONDIM, L. M.; RICARDO, N. M. P. S.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Exploiting epoxidized cashew nut shell liquid as a potential bio-additive to improve asphalt binder performance. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 314, p. 128061, 2021.

VASCONCELOS, M. A. G. **Formulation D'um Bitume Vert**. Rapport de Stage. Laboratoire Central de Ponts et Chaussées de Nantes. Nantes, France, 2010

VASCONCELOS, M. A. G.. **Estudo sobre o emprego do Cape Seal em revestimentos rodoviários do Estado do Ceará**. 209 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

VIJAYKUMAR, A. **Validation of Surface Performance-Graded Specification For Surface Treatment Binders**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado), Texas A&M University, College Station, 2012.

WALUBITA, L. F.; MARTIN, A. E.; GLOVER, C. J.. **A Surface Performance Graded (SPG) Specification for Surface Treatment Binders: Development and Initial Validation**. Austin: Federal Highway Administration, 2005. 134 p.

WANG, H.; JING, Y.; ZHANG, J.; CAO, Y.; LYU, L. Preparation and performance evaluation of swine manure bio-oil modified rubber asphalt binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 294, p. 123584, 2021.

WANG, C.; XIE, T.; CAO, W. Performance of bio-oil modified paving asphalt: chemical and rheological characterization. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 52, n. 5, 2019.

YAN, K.; ZHANG, M.; YOU, L.; WU, S.; JI, H. Performance and optimization of castor beans-based bio-asphalt and European rock-asphalt modified asphalt binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 240, p. 117951, 2020.

YANG, B.; ZHANG, Y.; CEYLAN, H.; KIM, S. Evaluation of bio-based fog seal for low-volume road preservation. **International Journal Of Pavement Research And Technology**, v. 13, n. 3, p. 303-312, 19 fev. 2020. DOI: 10.1007/s42947-020-0268-9.

YOU, Z.; MILLS-BEALE, J.; FINI, E.; GOH, S. W.; COLBERT, B. Evaluation of Low-Temperature Binder Properties of Warm-Mix Asphalt, Extracted and Recovered RAP and RAS, and Bioasphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 11, p. 1569–1574, 2011.

ZENG, M.; PAN, H.; ZHAO, Y.; TIAN, W. Evaluation of asphalt binder containing castor oil-based bioasphalt using conventional tests. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 126, p. 537–543, 2016.