



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURA ASFÁLTICA
USANDO LIGANTE MODIFICADO POR VIA SECA COM RESÍDUO
INDUSTRIAL E ESCÓRIA DE COBRE PÓS-JATEADA

Jéssica Horta Menezes Barros

SÃO CRISTÓVÃO

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURA ASFÁLTICA
USANDO LIGANTE MODIFICADO POR VIA SECA COM RESÍDUO
INDUSTRIAL E ESCÓRIA DE COBRE PÓS-JATEADA

Jéssica Horta Menezes Barros

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadora: Dsc. Gisélia Cardoso

Coorientador: Dsc. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida

Agência financiadora: CAPES

São Cristóvão

2022

JÉSSICA HORTA MENEZES BARROS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 30/08/2022

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 GISELIA CARDOSO
Data: 10/03/2023 10:46:37-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profa. Dsc. Gisélia Cardoso
Orientadora (PROEC/UFS)

Documento assinado digitalmente
 ERINALDO HILARIO CAVALCANTE
Data: 09/02/2023 09:59:25-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dsc. Erinaldo Hilário Cavalcante
Examinador interno (PROEC/UFS)



Profa. Dsc. Consuelo Alves da Frota
Examinadora externa (PPGCEM/UFAM)

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Barros, Jéssica Horta Menezes
B277a Análise de propriedades mecânicas de mistura asfáltica usando
ligante modificado por via seca com resíduo industrial e escória de
cobre pós-jateada / Jéssica Horta Menezes Barros ; orientadora
Gisélia Cardoso. - São Cristóvão, 2022.
91 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal de Sergipe, 2022.

1. Resíduos industriais. 2. Asfalto. 3. Mistura com emulsão
asfáltica I. Cardoso, Gisélia. Orient. II. Título.

CDU 625.06

DEDICATÓRIA

A Deus que me proporcionou graça e favor todos os dias para que eu pudesse fazer o que nem mesma eu achei que podia.

AGRADECIMENTOS

Dou graças aquele que me deu a vida e me capacitou com a força do Espírito Santo. É dele a minha força, minha alegria, meu tempo e meu título.

Agradeço ao meu marido que me deu suporte quando eu precisei e que além de compreender todos os momentos de ausência durante essa longa jornada acadêmica, me proporcionou momentos de alegria e alívio quando eu mais precisei.

Aos meus pais que me deram todo o apoio em favor dos meus estudos. Eles não puderam ter a mesma chance que eu, mas sempre incentivaram a realização desse mestrado como se fosse o deles.

Aos meus colegas de laboratório James Monteiro e Denes da Graça Santos que me auxiliaram nos ensaios laboratoriais e tornaram dias exaustivos em momentos de descontração.

À minha orientadora, Dsc. Gisélia Cardoso, por todos os ensinamentos e palavras de encorajamento para a conclusão da minha pesquisa.

Aos professores Guilherme Bravo, Erinaldo Cavalcante e Consuelo da Frota pelas contribuições na banca de qualificação.

Aos técnicos Willami, Luiza e Bruno pelo apoio nos materiais e ensaios necessários.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo (Processo 03/20/PROEC/UFS).

À empresa EMURB – Aracaju/SE, pela doação do ligante asfáltico CAP50/70 e agregados pétreos para a realização dessa pesquisa.

A todos, o meu muito obrigada.

RESUMO

Os inúmeros processos industriais atualmente geram diferentes resíduos e, o acúmulo destes motiva pesquisadores a estudar o seu uso no desenvolvimento de novas tecnologias e na minimização de impacto ao meio ambiente. Dessa forma, pesquisadores têm realizado estudos com o uso de resíduos industriais no desenvolvimento de novos materiais e, conseqüentemente, têm alcançado resultados satisfatórios e promissores. No tocante à engenharia de pavimento rodoviário, o aumento da densidade de tráfego e a adversidade climática têm levado o desenvolvimento de novas tecnologias de construção e o uso de novos materiais. Esses estão presentes nas camadas constituintes do pavimento, na modificação de ligante asfáltico e na composição dos agregados pétreos de misturas asfálticas de revestimento do pavimento flexível. O uso de resíduos sólidos vem sendo estudado como modificadores de ligante e como agregado miúdo em mistura asfáltica com o objetivo de aumentar o seu desempenho quanto à resiliência, a resistência à deformação permanente e ao envelhecimento precoce, contribuindo para aumentar a vida útil do pavimento. Neste contexto, este estudo teve por objetivo avaliar o comportamento mecânico de mistura asfáltica com ligante CAP 50/70 modificado, por via seca, com 10% m/m de *masterbatch* de borra oleosa e borracha de pneu, na proporção 15/85% m/m, tendo como escória de cobre pós-jateada como substituinte parcial do agregado pétreo miúdo. Para tal, a análise de estabilidade Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e resistência à abrasão Cântabro foram realizadas. Os resultados das análises de estabilidade Marshall e resistência à tração por compressão diametral da mistura asfáltica com ligante modificado com resíduo industrial, contendo escória de cobre como agregado pétreo miúdo, foram superiores ao limite mínimo recomendado por norma. O módulo de resiliência foi 23,73% inferior ao da mistura asfáltica CAP 50/70. Apesar disso, os resultados das propriedades mecânicas analisadas indicam a viabilidade do uso dos resíduos industriais, em estudo, na composição de mistura asfáltica, para revestimento de pavimento rodoviário, com a vantagem do processo de modificação do ligante asfáltico, por via seca, submeter o ligante asfáltico a um menor tempo de exposição a alta temperatura que o processo de modificação de ligante por via úmida o que evita o envelhecimento precoce do ligante asfáltico, decorrente da longa exposição ao calor.

Palavras-chave: resíduos industriais, ligante modificado, escória de cobre pós-jateada, borracha de pneu, borra oleosa de petróleo.

ABSTRACT

The numerous industrial processes currently generate different residues, and the accumulation of these motivates researchers to study their use in the development of new technologies and in the minimization of impact on the environment. In this way, researchers have carried out studies with the use of waste in the development of new materials and, consequently, have achieved satisfactory results. With regard to road pavement engineering, the increase in traffic density and adverse weather conditions have led to the development of new construction technologies and the use of new materials. These are present in the constituent layers of the pavement, in the modification of the asphalt binder and in the composition of the stone aggregates of asphalt concrete covering the flexible pavement. The use of solid waste has been studied as binder modifiers and as a fine aggregate in asphalt concrete with the aim of increasing its performance in terms of resilience, resistance to permanent deformation and premature aging, contributing to increase the useful life of the pavement. In this context, this study aimed to evaluate the mechanical behavior of asphalt concrete with modified CAP 50/70 binder, by dry process, with 10% m/m of oily sludge masterbatch and tire rubber, in the proportion 15/85% m/m, having as a fine aggregate post-blasted copper slag. For this, the analysis of Marshall stability, tensile strength by diametral compression, modulus of resilience and Cantabro abrasion resistance were performed. The results of the analysis of Marshall stability and tensile strength by diametrical compression of asphalt concrete with binder modified with industrial waste, containing copper slag as fine stone aggregate, were higher than the minimum limit recommended by the norm. The resilience modulus was 23.73% lower than that of the CAP 50/70 asphalt concrete, which can be improved by increasing the concentration of tire rubber in the masterbatch. Despite this, the results of the mechanical properties analyzed indicate the feasibility of using the industrial waste under study in the composition of asphalt concrete for road pavement, with the advantage of the process of modifying the asphalt binder by dry process. In addition, when comparing this process to the modification of the binder by wet method, it can be seen that it prevents the early aging of the asphalt binder, due to the long exposure to heat.

Key words: industrial waste, modified binder, copper slag, tire rubber, oily petroleum sludge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do pavimento asfáltico.....	20
Figura 2 – Componentes gerais do pneu.	27
Figura 3 – Cadeia de reposição de pneus.	28
Figura 4 – Estabilidade Marshall em relação a porcentagem de borracha de pneu.....	32
Figura 5 – Representação esquemática do procedimento de caracterização dos materiais, dosagem e ensaios mecânicos do concreto asfáltico.	43
Figura 6 – Aparelhagem empregada no ensaio de adesividade.....	45
Figura 7 – CP's utilizados na dosagem Marshall CAP 50/70 modificado em estudo.....	50
A Tabela 8 apresenta a fotografia sequencial dos aparelhos utilizados na execução dos CP's.	
	Fi
Figura 8 – Fotografia sequencial dos aparelhos utilizados na execução dos CPs.	51
Figura 9 – Prensa Marshall o modelo I-2001-A - CONTENCO.....	53
Figura 10 – Prensa elétrica usada no Ensaio de RTCD.....	55
Figura 11 – Equipamento usado na medida do módulo de resiliência. Modelo: SEMBS	56
Figura 12 – CP's de amostras não modificadas (PR) e modificadas (5,3) após ensaio de abrasão - Cântabro	57
Figura 13 – Curva granulométrica dos agregados utilizados no concreto asfáltico com CAP 50/70 não modificado e modificado em estudo.....	58
Figura 14 – Curva adotada e os limites da faixa C do DNIT para a mistura asfáltica de CAP 50/70 e modificada por via seca.	59
Figura 15 – Micrografia da escória obtida em microscópio óptico com aumento de 200x.	61
Figura 16 – Fotografia da aparelhagem usada no ensaio de adesividade da escória de cobre pós-jateada a) água destilada e b) M/256.	62

Figura 17 – Fotografia da aparelhagem usada no estudo de adesividade da escória de cobre pós-jateada de acordo com a norma de agregado graúdo – DNER-ME 078 (1998).....	63
Figura 18 – Micrografia de escória de cobre pós-jateada após o ensaio de adesividade obtida em microscópio óptico interfaciado ao computador com um aumento de 200x.	63
Figura 19 – Determinação do teor de CAP 50/70 não modificado por dosagem Marshall.....	64
Figura 20 – Determinação do teor de CAP 50/70 modificado por via seca por dosagem Marshall.	65
Figura 21 – Resultado de estabilidade Marshall de misturas asfálticas com ligante não modificado e modificado por via seca.	67
Figura 22 – Resultado de estabilidade Marshall da mistura asfáltica modificada por via seca e da mistura modificada por via seca apenas com borracha de pneu e borra oleosa.....	67
Figura 23 – Resultado da resistência a tração por compressão diametral da amostra com CAP 50/70 não modificado e CAP 50/70 modificado por via seca.	70
Figura 24 – Resultado da resistência à tração por compressão diametral da mistura asfáltica modificada com por via seca e da mistura modificada por via seca com borracha de pneu e borra oleosa.	71
Figura 25 – Resultado do modulo de resiliência da amostra com CAP 50/70 não modificado e CAP 50/70 modificado por via seca.	71
Figura 26 – Resultado do modulo de resiliência da amostra com CAP 50/70 não modificado e CAP 50/70 modificado por via seca.	73
Figura 27 – Fotografia dos CP's após o ensaio de cântabro – a) CP's do CAP 50/70 não modificado e b) CP's do CAP 50/70 modificado por via seca.	74
Figura 28 – Resultado de desgaste por abrasão – Cântabro de misturas asfálticas com ligante não modificado e modificado por via seca.	75
Figura 29 – Micrografia por microscópio óptica da face de ruptura do MISTURA ASFÁLTICA com o CAP 50/70 após o ensaio de estabilidade Marshall com aumento de 400x.	76

Figura 30 – Micrografia por microscópio óptico da face de ruptura do concreto asfáltico do CAP 50/70 após o ensaio de resistência a compressão diametral com aumento de 200x.....	76
Figura 31 – Micrografia por microscopia óptica após o ensaio estabilidade Marshall para o concreto asfáltico CAP 50/70 modificado por via seca com aumento de 400x.	77
Figura 32 – Micrografia por microscópio óptico após o ensaio de RTCD para o mistura asfáltica CAP 50/70 modificado, por via seca, com aumento de 400x.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP)	23
Tabela 2 - Composições químicas básica de ligante asfaltos.	24
Tabela 3 - Benefício de diferentes modificadores de ligante no mistura asfáltica	26
Tabela 4 – Dosagem Marshall do CAP 50/70 modificado por via seca com borracha de pneus	29
Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas típicas da escória de cobre.....	33
Tabela 6 – Granulometria de escória de cobre pós-jateada.	34
Tabela 7 – Faixas Granulométricas recomendadas pelo DNIT para mistura asfáltica.....	40
Tabela 8 – Massa específica e absorção de água dos agregados	46
Tabela 9 – Perda de massa por abrasão Los Angeles	47
Tabela 10 – Características do CAP 50/70 fornecida pelo fabricante.	47
Tabela 11 – Penetração, Ponto de amolecimento e Massa específica do CAP 50/70	48
Tabela 12 – Viscosidade Brookfield do CAP 50/70	48
Tabela 13 – Temperatura do processamento da mistura	51
Tabela 14 – Resultados da análise granulométrica dos agregados da pesquisa.	59
Tabela 16 – Resultado do ensaio de densidade real da escória de cobre pós-jateada.	60
Tabela 17 – Resultado do ensaio de adesividade na presença de carbonato de sódio.....	62
Tabela 18 – Resultados da dosagem do CAP 50/70 não modificado, modificado e CAP 50/70 modificado por Pereira (2020).....	66
Tabela 19 – Densidade e absorção dos corpos de prova do ligante modificado, por via seca, e não modificado.	66
Tabela 20 – Resumo dos resultados desta pesquisa e do estudo de Pereira (2020)	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABEDA - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ADP – Asfalto de Petróleo Diluído
- ANIP - Associação Nacional de Indústria do Pneumático
- ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- BPD – Barris por dia
- CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
- CAUQ – Mistura asfáltica Usinado a Quente
- CM – Cociente Marshall
- CP – Corpo de prova
- DMT – Massa específica máxima teórica
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
- GPDCmat - Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento e Caracterização de Materiais
- ICSG - International Copper Study Group
- MR – Módulo de Resiliência
- NBR – Norma Brasileira
- PROEC - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
- RBV – Relação Betume Vazios
- RT – Resistência à Tração
- RTCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral
- RTFO - *Rolling Thin Film Oven*
- SC – Escória de Cobre
- Va – Porcentagem de vazios do concreto
- VAM – Volume de Vazios no Agregado Mineral
- VV – Volume de Vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_r – Resistência à tração do ensaio de RTCD.

ΔH – Deslocamento horizontal, na interseção das duas tangentes.

h - Espessura do corpo-de-prova.

MR – Módulo de resiliência.

P – Carga cíclica.

F – Carga de ruptura.

$G_a, G_{Ag}, G_{Ai}, G_{Pó}$ – São, respectivamente, massa específica do ligante, do agregado graúdo, agregado intermediário e pó de pedra presente na mistura, respectivamente.

H – Altura do corpo-de-prova

A – Massa do corpo de prova seco no ensaio de Absorção

B – Massa do corpo de prova submerso na água no ensaio de Absorção.

C – Massa do corpo de prova seco no ensaio de absorção.

d – Diâmetro do corpo-de-prova.

f – Fator de correção do ensaio de estabilidade Marshall.

D_t – Densidade real do agregado à temperatura.

P_1 – Peso do picnômetro vazio e seco.

P_2 – Peso do picnômetro mais amostra.

P_3 – Peso do picnômetro mais amostra, mais água.

P_4 – Peso do picnômetro mais água.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações gerais.....	16
1.2	Justificativa	16
1.3	Hipótese	18
1.4	Objetivos.....	19
1.4.1	Objetivo Geral.....	19
1.4.2	Objetivos Específicos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Pavimento rodoviário.....	20
2.2	Ligante asfáltico.....	22
2.3	Modificação de ligante asfáltico	24
2.4	Resíduos industriais	26
2.4.1	Borracha de Pneus.....	26
2.4.2	Escória de cobre	32
2.4.3	Borra de Petróleo	37
2.5	Mistura asfáltica.....	38
2.6	Dosagem de ligante asfáltico em misturas asfálticas.....	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Materiais	42
3.2	Métodos	42

3.2.1	Caracterização da borra oleosa	43
3.2.2	Caracterização da borracha de pneu	44
3.2.3	Caracterização da escória de cobre pós-jateada.....	44
3.2.3.1	Adesividade.....	44
3.2.3.2	Massa específica real	45
3.2.3.3	Caracterização dos agregados minerais	46
3.2.3.4	Características do CAP 50/70	47
3.2.3.5	Preparação do <i>masterbatch</i>	48
3.2.3.6	Dosagens das misturas asfálticas (determinação do teor de ligante de projeto)	49
3.2.3.7	CAP 50/70 modificado e não modificado.....	50
3.2.3.8	Densidade e absorção dos corpos de prova.....	52
3.2.4	Ensaio mecânicos	52
3.2.4.1	Estabilidade e fluência Marshall.....	53
3.2.4.2	Resistência à tração por compressão diametral	54
3.2.4.3	Módulo de Resiliência	56
3.2.4.4	Desgaste por abrasão - Cântabro.....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	Caracterização dos materiais	58
4.1.1	Caracterização dos agregados	58
4.1.2	Caracterização da escória de cobre pós-jateada (ECPJ)	60
4.2	Dosagem marshall.....	64

4.3	Densidades e absorção dos corpos de prova	66
4.4	Ensaio mecânicos	67
4.4.1	Estabilidade Marshall.....	67
4.4.2	Resistência à tração por compressão diametral	70
4.4.3	Módulo de resiliência.....	71
4.4.4	Desgaste por abrasão – Cântabro	73
4.4.5	Superfícies de ruptura após ensaios mecânicos	75
4.4.6	Resumo dos resultados da pesquisa comparado com os resultados de Pereira (2020) 78	
5	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O pavimento rodoviário é formado por camadas múltiplas com funções de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente, e o seu desempenho está associado a um complexo conjunto de fatores, dentre eles as propriedades físicas e mecânicas dos materiais que o constituem (SPECHT, 2004).

As propriedades da camada de revestimento para pavimentos flexíveis, por exemplo, estão associadas à combinação do ligante asfáltico e do agregado pétreo, podendo conter materiais de preenchimento (ODA, 2000). O ligante pode ser um cimento asfáltico ou cimento asfáltico modificado (SUN *et. al*,2016), com principal função de agir como aglutinante dos agregados e impermeabilizante do concreto de revestimento do pavimento rodoviário.

Os estudos sobre asfalto modificado avançaram nos últimos anos (GHUZLAN e AL ASSI, 2017; CONG *et. al*, 2016; NASREKANI *et. al*,2016; PRESTI, 2013), principalmente por ser uma alternativa para melhorar o desempenho e prolongar a vida útil do pavimento rodoviário. Além disso, são vários os estudos disponíveis na literatura abordando os asfaltos modificados com o emprego de resíduos industriais visando, entre outras coisas, a redução dos impactos negativos ao meio ambiente (KOCÁK E KUTAY, 2020; RATH *et. al*, 2019; HERNÁNDEZ-OLIVARES *et. al*,2009).

A indústria de pneumáticos no Brasil, a propósito, gerou mais de 380 mil toneladas de pneus inservíveis no ano de 2019 (ANIP, 2020). O resíduo advindo do processo de extração de cobre é de cerca de 2,2 toneladas de escória por tonelada de metal (GORAI E JANA, 2003). E, no ano de 2016, a produção de cobre foi de 20,36 milhões de toneladas (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019), o que gerou, aproximadamente,44,8 milhões de toneladas de escória.

As indústrias de petróleo (extrações e refinarias) e as indústrias químicas geram grandes quantidades de resíduos sólidos. A extração de petróleo, nas estações de tratamento de óleo bruto, produz grande quantidade de borra oleosa, que são geradas no fundo dos tanques de armazenamento cotidianamente (ANDRADE, BRITO E MUNIZ, 2014).

Diante das considerações descritas sobre geração de resíduos industriais, a indústria da construção civil tem investigado o uso de resíduo como material de construção, com a finalidade de seu uso racional.

Ziari *et. al* (2017) publicaram um estudo sobre a incorporação de escória de cobre nas proporções de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% da massa total dos agregados em substituição aos agregados de calcário em mistura asfáltica a quente (CAUQ). Os resultados indicaram que 20% de escória de cobre na mistura aumentou o módulo de resiliência (MR), de 3800 MPa para 5000 MPa, em relação a amostra não modificada. Em contrapartida, houve redução de 12% o MR da mistura que contém 40% de escória de cobre, em relação à mistura com 20%. Porém, esse valor é cerca de 16% maior em relação à amostra não modificada.

Da Graça, Cardoso e Cavalcante (2016) apresentaram um estudo de ligante asfáltico CAP 50/70 modificado com 10% e 20% em massa de blenda de borracha de pneus inservíveis com borra de petróleo, nas proporções de 15/85% (CM1) e 85/15% (CM2), respectivamente. Os resultados mostraram que as misturas com o CM1 de comportamento reológico de plástico ideal, apresentaram RTCD (resistência à tração por compressão diametral) superior ao CAP 50/70, enquanto as misturas com o CM2, de comportamento pseudoplástico, apresentaram RTCD inferior ao CAP 50/70, porém, superior ao valor mínimo estabelecido pela norma DNER-ME 136 (2018).

Através do desenvolvimento de novas tecnologias, resíduos industriais podem responder com sucesso na substituição de materiais convencionais de construção civil, com sustentabilidade e preservação ao meio ambiente.

Nesse estudo a mistura asfáltica de ligante modificado, por via seca, com resíduo industrial, tendo como substituto parcial do agregado miúdo escória de cobre pós-jateada, será processado e avaliado quanto ao seu comportamento mecânico.

1.2 JUSTIFICATIVA

É crescente a demanda por mistura asfáltica de alta qualidade para o revestimento de pavimento rodoviário, com o objetivo de conferir aos pavimentos longa vida útil e baixa manutenção.

A pesquisa sobre o uso de novos materiais em processamento de mistura asfálticas tem motivado muitos pesquisadores (BARDINI *et. al*, 2018; BILLITER *et. al*, 1997; HEITZMAN, 1992; HERNÁNDEZ-OLIVARES *et. al*, 2009; HUANG, BIRD E HEIDRICH, 2007; PARANAPANEMA, 2016; PRESTI, 2013). O Grupo de Pesquisa em Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (GPDCMat), integrante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROEC/UFS), vem nas últimas décadas estudando estabilidade térmica, dosagem e comportamento mecânico de mistura asfáltica de ligante modificado, por via úmida e por via seca, com *masterbatch* de borra oleosa de petróleo e borracha de pneus inservíveis. Os resultados publicados são satisfatórios, uma vez que atendem as normas técnicas referentes ao comportamento reológico, térmico e mecânico (da GRAÇA, CARDOSO E CAVALCANTE, 2016; SANTANA *et. al*, 2018; PEREIRA, 2020).

O uso do *masterbatch* de borra oleosa de petróleo e borracha de pneus inservíveis se fez necessário para vencer a dificuldade da dispersão da borra oleosa de petróleo no ligante asfáltico (da GRAÇA, CARDOSO E MOTHÉ, 2019).

Dando continuidade à supracitada pesquisa do GPDCMat (PROEC/UFS), o presente estudo, trata de processamento e caracterização mecânica de mistura asfáltica de ligante modificado, por via seca, com resíduo industrial (borra oleosa de petróleo e borracha de pneus) tendo como agregado miúdo escória de cobre pós-jateada.

1.3 HIPÓTESE

A mistura asfáltica com ligante modificado, com *masterbatch* de borra oleosa de petróleo e borracha de pneus, por via seca, tendo a escória de cobre pós-jateada como substituinte parcial do agregado pétreo miúdo, apresenta a probabilidade de atender as normas técnicas e de responder às atuais condições de uso, como material de revestimento de pavimento rodoviário, devido ao *masterbatch* conferir ao ligante o perfil de comportamento viscoso pseudoplástico que favorece a molhabilidade e o aumento da adesividade entre os agregados pétreos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Avaliar propriedades mecânicas de mistura asfálticas do tipo CAUQ com ligante asfáltico CAP 50/70 modificado, por via seca, com *masterbatch* de resíduo industrial contendo escória de cobre pós-jateada substituinte parcial de agregado miúdo.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar propriedades mecânicas da mistura asfáltica do ligante CAP 50/70 modificado por via seca com *masterbatch* de borra oleosa e borracha de pneus na concentração 15/85 %, tendo como agregado miúdo a escória de cobre pós-jateada
- b) Analisar as vantagens e as desvantagens do uso dos resíduos industriais em estudo na obtenção de mistura asfáltica do tipo CAUQ para revestimento de pavimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o estado da arte sobre pavimento rodoviário, mistura asfáltica tipo CAUQ de ligante modificado com resíduos industriais: borracha de pneus, escória de cobre pós-jateada e borra oleosa de petróleo, quanto à concentração destes na mistura, ao processamento e ao comportamento mecânico.

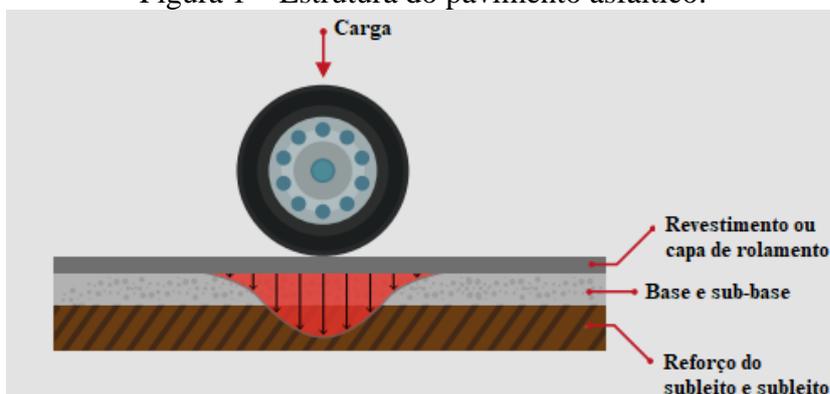
2.1 PAVIMENTO RODOVIÁRIO

O pavimento é uma estrutura em camadas de espessura finitas, construída sobre uma fundação: o subleito. De modo geral, classifica-se como rígidos e flexíveis. Porém, hoje, é comum usar a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento (BERNUCCI *et. al.*, 2008).

De acordo com Torrão (2015), os pavimentos asfálticos apresentam na sua constituição camadas de materiais granulares e betuminosos. O seu desempenho está condicionado às características mecânicas das suas camadas estruturantes que dependem do processo executivo, bem como das características dos materiais utilizados (solo, agregados, finos e ligantes) dosados na sua composição (MENDES E MARQUES, 2012).

Nos pavimentos flexíveis, a carga se distribui de forma aproximadamente equivalente entre as camadas, que permite observar um campo de tensão muito concentrado nas proximidades do ponto de vista de aplicação da carga (CNT, 2017). Dessa forma, as camadas geralmente são mais espessas com a finalidade de proteger o subleito (Figura 1).

Figura 1 – Estrutura do pavimento asfáltico.



Fonte: CNT (2017)

Segundo Singh e Sahoo (2021), as camadas do pavimento são organizadas na ordem de capacidade de carga crescente. Francisco (2012) divide as camadas em superiores e inferiores. As superiores são constituídas por materiais betuminosos que conferem uma considerável deformabilidade ao pavimento (camada de rolamento e camada de ligação), e a camada de base que confere resistência à tração. Já as camadas inferiores são constituídas por material granular e juntamente com o solo de fundação conferem resistência às tensões de compressão ao pavimento.

Nessas camadas podem ser utilizados materiais comuns da construção civil ou ainda incentivar a utilização de novos materiais com o intuito de melhorar as propriedades dos estratos. Nesse caso, os resíduos industriais são utilizados com a justificativa do uso racional de recursos naturais e a diminuição dos impactos ambientais (WESSELING, 2005). Além disso, deve-se frisar que qualquer material a ser utilizado para fins de construção deve ser submetido a teste de propriedade semelhante ao do material convencional. O produto deve atender as normas técnicas quanto à resistência mínima, estabilidade, durabilidade e outras especificações (GAUTAM *et. al*, 2018). Alguns desses resíduos podem ser escória de aciaria, areia de fundição, polímeros, elastômeros, escória de cobre, borracha de pneu, bio-óleo, entre outros.

Um exemplo disso é a adição de resíduos plásticos na modificação do asfalto em misturas a quente e seus concretos tipo CAUQ. Dalhat e Wahhab (2015) afirmam que o módulo de resiliência aumenta em pelo menos 55% comparado à amostra controle. Além disso, os concretos CAUQ atendem ao requisito de baixa temperatura da região (Arábia Saudita) e apresentam uma melhoria significativa no desempenho do revestimento do pavimento.

Sun *et. al* (2016) em seus estudos relataram que o asfalto modificado com bio-óleo derivado de resíduos de óleo de cozinha diminui o ponto de amolecimento e a viscosidade, aumenta a penetração e ductibilidade em relação à amostra controle. Além disso, a mistura asfáltica com ligante modificado com bio-óleo diminui o módulo complexo e a rigidez à fluência, reduz a resistência à deformação e auxilia na melhoria de resistência ao fissuramento térmico.

A utilização da escória de ferro níquel na mistura asfáltica CAUQ, estudada por Santos (2013), resultou nos ensaios de avaliação mecânica, isto é, 1,44 MPa para resistência à tração (RT) e 999,8 kgf para estabilidade Marshall. Esses resultados são compatíveis com os limites

da norma DNIT 031 (2006) que estabelece o mínimo de 0,65 MPa para RT e 500 kgf para a estabilidade Marshall.

2.2 LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico utilizado em misturas para revestimento da camada de rolamento de pavimentação rodoviária é obtido industrialmente através da destilação do petróleo bruto (CRAVO, 2016). Tem a propriedade de ser um ligante termoviscoplastico, impermeável a água e pouco reativo.

Geralmente, os ligantes asfálticos são classificados de acordo com seu processo de produção: cimento asfáltico de petróleo (CAP), asfalto de petróleo diluído (ADP) e emulsão asfáltica.

Em relação aos CAP's, o processo é realizado através da destilação de tipos específicos de petróleo, na qual as frações leves (gasolina, diesel e querosene) são extraídas no refino. Os produtos resultantes são constituídos por duas principais frações orgânicas distintas: maltenos - compostos saturados, aromáticos e resinas, e asfaltenos – fração de compostos mais pesados e polares (FERNANDES *et. al*, 2013).

Em condições extremas, baixa temperatura e curto tempo de carregamento, o CAP se comporta como sólido elástico e, em alta temperatura e longo tempo de carregamento, como líquido viscoso (SIMIONATO, SILVA JÚNIOR E FONTENELE, 2018).

Em julho de 2005 foi aprovada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) uma nova especificação de CAP para todo o Brasil. A especificação baseia-se na penetração e em ensaios específicos. Os tipos de CAP's são: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200.

A Tabela 1 mostra a especificação brasileira de CAP's, que incorpora os procedimentos experimentais de caracterização diferenciados, tais como viscosidade rotacional, obtida através do viscosímetro Brookfield e o envelhecimento pelo método *Rolling Thin Film Oven* (RTFO) entre outros, mais representativos na definição das suas características (ANP, 2005, *apud* DOS SANTOS, 2017).

Tabela 1 - Especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Características	Unidade	Limite			
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150/200
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200
Ponto de amolecimento, min.	°C	52	46	43	37
Viscosidade de Saybolt-Furol					
a 135°C, min.	s	192	141	110	80
a 150°C, min.	-	90	50	43	36
a 177°C	-	40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60
Viscosidade Brookfield					
a 135°C, min. SP 21, 20rpm, min.	CP	374	274	214	155
a 150°C, min.	-	203	112	97	81
a 177°C, SP 21	-	76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114
Índice de Suscetibilidade Térmica	-	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)
Ponto de fulgor, min.	°C	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, min.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Dutilidade a 25°C, min.	cm	60	60	100	100
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos					
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5
Dutilidade a 25°C	cm	10	20	50	50
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8
Penetração retida, min.	%	60	55	55	50

Fonte: ANP (2005) *apud* dos Santos(2017)

A composição química do ligante varia de acordo com a origem e o fracionamento do petróleo e o tratamento a que se submete nas usinas asfálticas. O método mais moderno atualmente empregado para a sua caracterização e o normatizado pela ASTM D 4124-01 separa e quantifica as frações de: saturados, naftaleno-aromático, polar-aromáticos (resinas) e asfaltenos (BERNUCCI *et. al*, 2008).

Segundo Leite (1999), os componentes do CAP têm relação com as suas propriedades físicas.

- Saturados: Têm influência negativa na suscetibilidade térmica. Em maior concentração amolecem o produto;

- Aromáticos: Agem como plastificantes, contribuindo para a melhoria de suas propriedades físicas;
- Resinas: Têm influência negativa na suscetibilidade térmica, mas contribuem na melhoria da ductibilidade e dispersão dos asfaltos;
- Asfaltos: Contribuem para a melhoria da suscetibilidade térmica e aumento da viscosidade.

A Tabela 2 apresenta a análise elementar de 6 asfaltos de diferentes fontes de petróleo. As reações carbono/hidrogênio nos asfaltos são semelhantes na maioria dos casos, mas a concentração de heteroátomos tende a variar.

Tabela 2 - Composições químicas básica de ligante asfaltos.

Origem	Mexicano	Boscan Venezuela	Califórnia Estados Unidos	Cabiúnas Brasil	Cabiúnas Brasil	Árabe Leve Oriente Médio
Refinaria	-	RLAM Bahia	-	Regap Minas Gerais	Replan São Paulo	Reduc Rio de Janeiro
Carbono %	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio %	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio %	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre %	5,2	5,4	1	0,96	2,1	4,4
Oxigênio %	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio ppm	180	1380	4	38	210	78
Níquel ppm	22	109	6	32	66	24

Fonte: Leite (2003)

Apesar de a composição química estar relacionada às propriedades físicas, deve-se destacar que os asfaltos podem apresentar propriedades físicas semelhantes, mesmo com diferentes composições. Dessa forma, é impossível garantir um comportamento adequado a partir de componentes químicos individuais mínimos, do ponto de vista de desempenho na pavimentação. Porém, é inegável que para se obter melhores desempenhos do CAP em mistura asfáltica, é necessária a presença de aditivos e de determinados agentes modificadores que possam lhe atribuir melhor desempenho na mistura asfáltica (CERATI, BERNUCCI E SOARES, 2015). Quando ao CAP é aditivado, diz-se que este é um ligante asfáltico modificado.

2.3 MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO

Segundo Pinheiro (2004), os asfaltos convencionais atendiam satisfatoriamente as características das misturas empregadas na maioria dos revestimentos dos pavimentos rodoviários brasileiros. Porém, com o aumento da frota de veículos e da carga por eixo em veículos pesados, nos pavimentos rodoviários com alta densidade de tráfego, há necessidade de novos projetos de misturas asfálticas para atender essa demanda. Assim, pode-se dizer que a modificação do ligante asfáltico é considerada como uma forma de solucionar esse problema.

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos – ABEDA (2021), o asfalto modificado é um ligante asfáltico especial produzido a partir da modificação do cimento asfáltico de petróleo, que conferem propriedades superiores aos concretos asfálticos convencionais, minimizando os tipos mais frequentes de falha nos concretos de revestimento de pavimentos.

Zhang (2019) define um modificador de ligante asfáltico como um material orgânico natural, artificial ou inorgânico adicionado ao ligante asfáltico ou à mistura asfáltica com o papel de aumentar a sua resistência à deformação permanente em altas temperaturas sem afetar o seu desempenho nas demais propriedades. Isto é, sem elevar a sua rigidez e comprometer a sua resposta viscoelástica na temperatura de uso (LEWANDOWSKI, 1994). Daí pesquisadores de todo o mundo vem experimentando inúmeros modificadores de ligante (GHUZLAN e AL ASSI, 2017; LEWANDOWSKI, 1994; NASREKANI *et. al*, 2016; NGUYEN e TRAN, 2017; ONOFRE *et. al*, 2013; CONG *et. al*, 2016).

Ao buscar as supracitadas características aos ligantes asfálticos modificados, é inegável que existam, hoje, vários tipos de modificadores em uso em ligantes asfálticos e novos concretos asfálticos patenteados e em uso, entre eles, concretos asfálticos de ligantes modificados com polímeros e com borracha de pneus (PLUSRIDE, 1970; OVERFLEX, 1963; AR-R-SCHIELD, 1970)

A Tabela 3 apresenta de forma qualitativa o impacto de diversos modificadores de ligantes asfálticos no desempenho de concretos asfálticos quanto à vida útil no revestimento do pavimento rodoviário, levando em consideração defeitos como deformação permanente, fadiga de trincas térmicas, envelhecimento e adesividade.

Tabela 3 - Benefício de diferentes modificadores de ligante no mistura asfáltica

Modificador	Deformação Permanente	Trincas Térmicas	Trincas por Fadiga	Dano por umidade	Envelhecimento
Elastômeros	x	x	x		x
Plastômeros	x				
Borracha de pneu	x	x	x		x
Negro-de-fumo	x			x	x
Cal					x
Enxofre	x				
Modificadores químico	x				
Antioxidante					x
Melhorador de adesividade				x	x
Cal hidratada				x	x

Fonte: SHELL (2003)

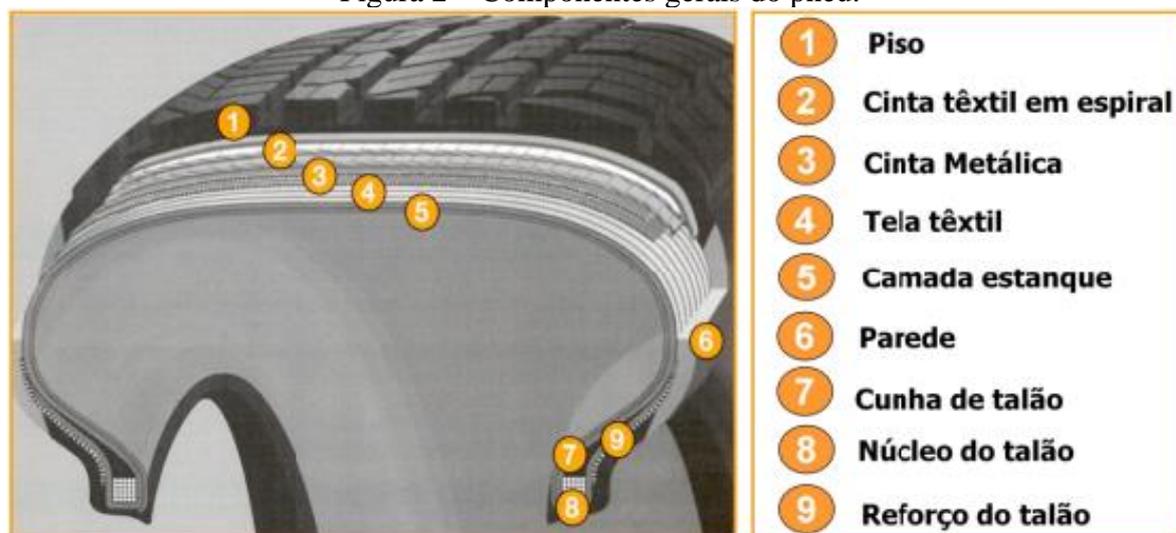
Há também agentes modificadores não convencionais como nanoargila, por exemplo. Segundo Goh *et. al.* (2011) a incorporação de percentuais inferiores a 2% em massa de nanoargila e microfibras de carbono ao ligante asfáltico, provoca aumento da resistência à umidade induzida e resistência à tração em concretos asfálticos densos, em relação ao concreto de controle. O melhor desempenho nesse caso foi o modificado com 1,5% de nanoargila e 1,5% de microfibras de carbono, com um aumento na resistência em cerca de 40%. No geral, os autores concluíram que a adição desses materiais reduziu a suscetibilidade à umidade da mistura asfáltica na maioria das amostras estudadas.

2.4 RESÍDUOS INDUSTRIAIS

2.4.1 Borracha de pneu

Os pneus são uma estrutura de engenharia complexa que evoluiu de uma roda simples dos velhos tempos para os pneumáticos de hoje (RODGERS E ABDULLAHI, 2016). A Figura 2 apresenta uma forma ilustrativa dos componentes gerais que podem constituir um pneu, sendo eles: piso, cinta têxtil em espiral, cinta metálica, tela têxtil, camada estanque, parede, cunha de talão, núcleo de talão e reforço do talão.

Figura 2 – Componentes gerais do pneu.



Fonte: Brito (2011)

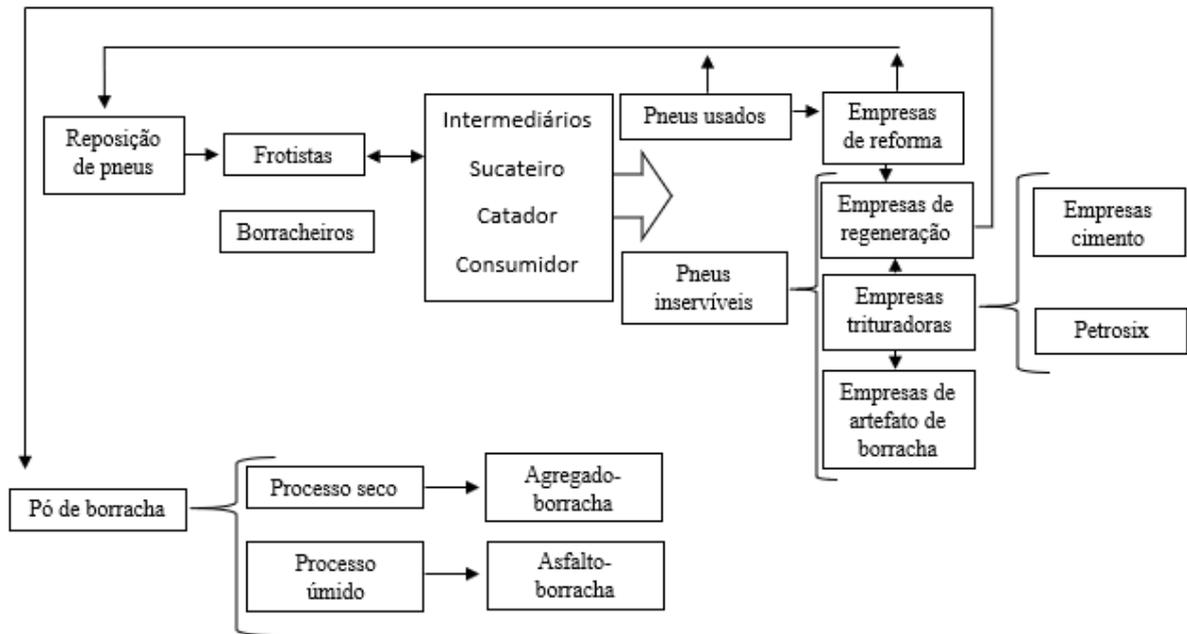
A aparência externa remete a composição de apenas borracha, porém é composto de elastômeros, negro de fumo, arame de aço, fibras e aditivos (RAMARAD *et. al*, 2015). Cada composto tem sua finalidade, exemplo disso, têm-se o negro de fumo que é utilizado para fortalecer a borracha e ajudar na resistência à abrasão. Porém, ele também é responsável pelos maiores problemas ambientais enfrentados pela indústria de pneumáticos, pois dificulta a reciclagem dos pneus usados (MASTRAL *et. al*, 2000).

A Associação Nacional de Indústria do Pneumático (ANIP) desde o início da operação até o final de 2019 coletou e destinou adequadamente mais de 5,23 milhões de toneladas de pneus inservíveis (RECICLANIP, 2019). Em 2020, especificadamente, foram destinadas 380 mil toneladas de pneus, que é equivalente a um pouco mais de 42 milhões de pneus de passeio. Em contrapartida, as vendas totais foram de 67,9 milhões de unidades, isto é, apenas 39% do volume de pneus vendidos foram destinados de forma correta.

Os pneus descartados de forma irregular apresentam sérios riscos ambientais. Como o aterro é uma das principais formas de descarte (ADHIKARI e MAITI, 2000), ocorre a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, além de possíveis incêndios no local, emitindo gases tóxicos.

Hoje, existe uma cadeia de destinação de pneus e essa, de acordo com Motta (2008), inicia-se com a necessidade do consumidor. A partir dessa necessidade, o pneu pode percorrer diversos caminhos até a sua deposição final. Na Figura 3, pode-se observar a cadeia de destinação do produto.

Figura 3 – Cadeia de reposição de pneus.



Fonte: Motta (2008)

Os pneus radiais, geralmente, são triturados e depois encaminhados para empresas produtoras de cimento, para queima nos fornos de clínquer; ou os pneus podem ser encaminhados para empresas regeneradoras de borracha, que os transforma em pó de borracha (MOTTA, 2008). Esse material pode ser utilizado e incorporado na pavimentação.

Essa incorporação pode ocorrer de duas formas distintas. A primeira, chamada de processo seco, consiste em utilizar a borracha como mais um agregado da mistura asfáltica, a borracha passa a ser chamada de agregado-borracha. A segunda, processo úmido, a borracha é misturada no ligante antes de misturar o ligante asfáltico modificado com o agregado. Nesse caso, o ligante é chamado de asfalto-borracha (BAKHEIT e XAIOMING, 2019).

No processo seco, as partículas de borracha (normalmente 1% a 3% por massa do agregado total na mistura) são utilizadas em substituição de parte dos agregados finos. A quantidade de borracha utilizada pode ser maior de 2 a 4 vezes que a incorporada no processo úmido (FONTES, 2009).

Bertollo *et. al* (2002) observaram que as misturas modificadas com agregado-borracha com granulometria fina (1,18 - 0,15mm) possuíam um melhor desempenho à deformação permanente e flexibilidade, quando comparadas as misturas convencionais. Em contrapartida,

as misturas com granulometria mais grossa (9,5 - 0,60mm) mostraram um excesso de deformação permanente e maior resiliência.

Existiam limitações iniciais que resultaram em uma falta de confiança no processo seco. Porém, após o processo de mistura, percebeu-se a necessidade de um tempo de condicionamento específico em alta temperatura para garantir uma adequada interação entre o ligante e a borracha reciclada (FERNANDEZ *et. al*, 2020).

Dentre os estudos realizados para analisar as propriedades da mistura de asfalto modificado com borracha de pneus inservíveis, destacam-se três trabalhos: Cao (2007), Rodríguez-Fernández *et. al* (2020) e Hernández-Olivares *et. al* (2009).

Cao (2007) utilizou partículas de borracha na faixa de 1 a 3 mm, fornecidas por uma indústria de borracha reciclada da cidade de Shanghai, China. A proporção de agregado graúdo (mais de 4,75 mm) foi ajustada de acordo com o conteúdo da borracha, e a dosagem do mistura asfáltica foi feita pelo método Marshall, com três teores diferentes de borracha (1%, 2% e 3%). O autor verificou que a densidade volumétrica, a estabilidade, fluência e o teor ótimo de asfalto são alterados pela adição de borracha de pneu. Como a gravidade específica da borracha é menor do que o do agregado, a densidade volumétrica específica da mistura diminui à medida que a borracha é adicionada. Além disso, devido à menor força de compressão e maior elasticidade da borracha, a estabilidade e fluência diminuem com o aumento do agregado-borracha. Os valores de estabilidade e fluência satisfizeram a dosagem Marshall, como apresenta a Tabela 4.

Tabela 4 – Dosagem Marshall do CAP 50/70 modificado por via seca com borracha de pneus

% Borracha	Resultados da dosagem Marshall						
	Massa específica aparente (g/cm ³)	Volume de vazios (%)	Vazios no agregado mineral (%)	Relação Betume vazios (%)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Teor ótimo de asfalto (%)
0	2,39	4,00	17,40	77,00	11,60	2,80	5,70
1	2,38	3,80	16,90	77,50	10,80	4,30	6,00
2	2,35	3,90	17,20	77,30	10,00	4,00	6,20
3	2,31	4,10	17,50	76,60	9,10	3,80	6,40

Fonte: Cao (2007)

A adição de borracha de pneu, segundo os resultados do estudo de Cao (2007), também melhorou as propriedades de resistência à deformação permanente em alta temperatura (60°C) e rachaduras em baixa temperatura (10°C).

O trabalho de Rodriguez-Fernández *et. al* (2020) teve como objetivo investigar o efeito da adição da borracha de pneu reciclada em misturas de asfalto usando o processo seco, relacionando o desempenho mecânico com caracterizações microestruturais. Dessa forma, três misturas de asfalto semidenso foram preparadas com um tamanho de agregado máximo de 4 mm e com 12% de vazios. Duas dessas misturas eram modificadas com borracha fragmentada (10% e 15% em relação ao aglutinante) com CAP 50/70, a outra era uma mistura de controle. A única diferença entre as misturas experimentais foi o tipo de borracha utilizada. Ambas as borrachas foram produzidas usando o método de moagem, porém, uma foi modificada por um revestimento de polímero (CR-A), enquanto a outra foi produzida sem qualquer modificação adicional (CR-B). Essas amostras após serem misturadas manualmente foram mantidas no forno em 165°C para diferentes tempos de condicionamento (30, 60, 120, 180, 240 e 300 min.).

O ensaio de viscosidade rotacional realizado na supracitada pesquisa por Rodriguez-Fernández *et. al* (2020) avaliou o grau de modificação das propriedades do betume. Ambas as amostras com 15% de borracha atingiram a viscosidade na faixa de tempo de condicionamento testado em laboratório (199 e 224 min. para CR-B e CR-A, respectivamente). Os resultados indicaram que existem diferenças da interação borracha-betume em função do tempo de condicionamento dependendo do tipo e conteúdo da borracha. As amostras com 15% de CR-B apresentaram uma variação maior na viscosidade do betume com 15% de CR-A. Os resultados indicam que a amostra CR-B interage mais rápido com o betume, ou seja, o processo de expansão e degradação ocorre mais rapidamente.

Em relação às propriedades volumétricas no estudo de Rodriguez-Fernández *et. al* (2020), a amostra não modificada com CAP 50/70 apresentou um maior teor de vazio do que as misturas experimentais. Nesse caso, os autores supuseram que as partículas de borracha adicionadas foram preenchendo parcialmente os vazios de ar das misturas asfálticas, resultando em misturas com menor teor de vazios. Entre as misturas experimentais, a CR-B apresentaram maior conteúdo de vazios de ar, que as misturas CR-A. Os pesquisadores concluíram que provavelmente essa diferença estava relacionada ao tratamento aplicado ao tipo da mistura. O revestimento de polímero de CR-A pode ter afetado a absorção da fração de luz do betume.

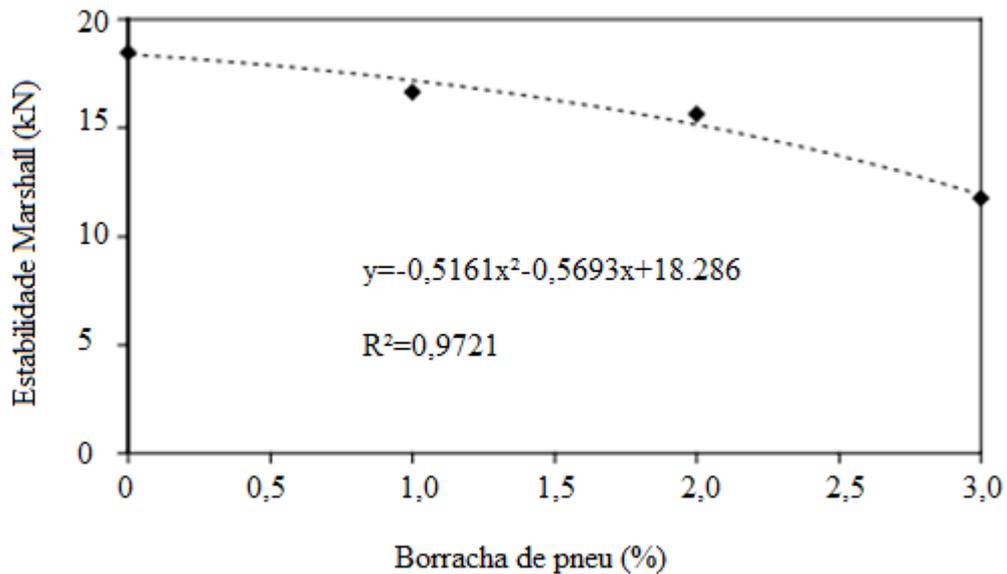
Em relação à estabilidade Marshall, Rodriguez-Fernández *et. al* (2020) observaram que o tempo de condicionamento tinha uma influência significativa nos resultados do ensaio, dependendo também do tipo de borracha utilizada. Todas as misturas modificadas apresentaram um aumento na estabilidade à medida que o tempo de condicionamento aumentava, em

comparação com a amostra controle. Ao comparar os tipos de borracha, o aumento foi maior na amostra CR-B, que na mistura CR-A. Em termos de *Flow number*, observou-se que os resultados também dependiam do CR utilizado. Para valores de cociente Marshall (CM), as misturas com CR-A apresentaram valores constantes para todos os tempos de condicionamento (cerca de 4,5 kN/mm). Já as amostras de CR-B, CM aumenta conforme o tempo de condicionamento aumenta (3,6 kN/mm para 60 min e 4,9 kN/mm com 120 min.).

Já o trabalho desenvolvido por Hernández-Olivares *et. al* (2009) tem foco na mistura de asfalto a quente modificado com borracha de pneu para pavimentos de tráfego por processo a seco. A pesquisa foi parcialmente realizada em laboratório e no local construindo um trecho experimental com 2,5 km de extensão em um tráfego secundário. A borracha fragmentada foi produzida por métodos de moagem e correspondem a um tamanho nominal máximo de 0,5 mm e 1 mm no tamanho da peneira. Para avaliar a porcentagem ideal de borracha na mistura, a densidade e a estabilidade Marshall com diferentes adições de borracha foram medidas.

Segundo Hernández-Olivares *et. al* (2009), a partir dos resultados experimentais pode-se afirmar que à medida que a porcentagem de borracha na mistura aumenta, a estabilidade Marshall das amostras diminui (conforme diminui a densidade da mistura) (Figura 4). Isso pode ter acontecido porque as partículas de borracha não estão totalmente dissolvidas no betume e se comportam elasticamente dentro da mistura. Por outro lado, as partículas de borracha tornam-se mais ásperas à medida que expandem, aumentando o seu volume e amolecendo o aglomerado. Em contrapartida, o betume modificado se torna mais rico em asfaltenos e diminui suas resinas e aromáticos, aumentando o seu índice coloidal.

Figura 4 – Estabilidade Marshall em relação a porcentagem de borracha de pneu



Fonte: Hernández-Olivares *et. al* (2009)

Para Hernández-Olivares *et. al* (2009), a porcentagem escolhida no estudo é de 1% do peso de agregados ou 20% do peso de betume. Na planta de fabricação, a borracha pode ser facilmente manuseada e pesada como enchimento convencional. Com esse baixo teor de borracha, a compactação da mistura pôde ser feita de maneira semelhante a uma mistura convencional nas operações de colocação.

Em relação aos dados obtidos, Hernández-Olivares *et. al* (2009) concluíram que o processo a seco foi considerado perfeitamente válido para misturas densas e não contínuas e permite a adição de 0,4% a mais de betume de asfalto. Por exemplo, de um teor de mistura de 5,1%, uma nova mistura pode ser obtida com um teor de betume de 5,5%, sem perder propriedades e melhorando a mistura convencional.

2.4.2 Escória de cobre

Por mais de cinco mil anos, o único metal conhecido pela humanidade era o cobre (ABCOBRE, 2020). A palavra tem origem latina *cuprum*, que significa “da ilha de Chipre”, e, conseqüentemente, atribuiu significado à sigla Cu, como símbolo químico do metal. Nesse caso, o cobre alcança a idade do faraó, uma vez que um pingente de cobre foi datado 8700 anos a.C., e descoberto onde hoje é o norte do Iraque.

Segundo Gorai e Jana (2003), para cada tonelada de produção do metal de cobre é gerada cerca de 2,2 toneladas de escória. Com dados mais recentes, pode-se dizer que a produção de

cobre alcançou a margem de 20,36 milhões de toneladas no ano de 2016 (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019), isto é, cerca de 44,8 milhões de toneladas de escória.

As estatísticas divulgadas pelo International Copper Study Group (ICSG) projeta a produção de cobre para atingir 26,4 milhões de toneladas em 2022 (ICSG, 2021). Com base nesses dados a produção de escória de cobre (*copper slag* - CS) pode ser estimada em quase 50 milhões de toneladas.

A CS primária é comumente composta de 30% a 40% de ferro, 35% a 40% de sílica, menos de 10% de alumina, menos de 10% de cálcio oxidado e, por último, 1% de cobre (SANCHEZ e SUDBURY, 2013). De acordo com Prem, Verma e Ambily (2018), essa escória é um produto obtido da fundição e refino do cobre. Nesse processo o ferro reage e se estabiliza em um silicato ferroso, denominado faialita. Esse é o principal constituinte da escória.

A CS granular resfriada tem cor preta e aparência vítrea e o seu peso unitário é um pouco maior que o do agregado convencional; a sua absorção, geralmente, é muito baixa (0,13%) (GORAI E JANA, 2003; ZAIN *et. al*, 2004; AL-JABRI, AL-SAYDY, TAHA, 2011). Por ser de cor negra, minimiza a reflexão, propiciando excelente visibilidade no jateamento em interiores (COSTA e FERREIRA, 2012). A Tabela 5 apresenta algumas das características físicas e mecânicas da escória de cobre.

Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas típicas da escória de cobre.

Aparência	Pétreo e vítreo
Unidade de peso	2800-3800 (kg/m ³)
Absorção %	0,13
Densidade aparente	2307-2595 kg/m ³
Peso específico	2,8-3,8
Dureza	6-7 Moh
Umidade	<5%
Perda de abrasão	24,1
Perda de solidez de sulfato de sódio (%)	0,9
Ângulo de atrito interno	40-53

Fonte: Gorai e Jana (2003)

Os resultados da caracterização física da escória de cobre pós-jateada realizada por Almeida (2016) revelaram uma densidade real de 3,73 com as seguintes frações: 0,06% de pedregulho, 92,32% de areia; 7,13% de silte e 0,49% de argila, o que permite caracterizá-la como uma areia. O valor alto da densidade está relacionado à quantidade de óxido de ferro

presente na escória, além da quantidade que se desprende da superfície metálica no processo de jateamento (RAPOSEIRAS, *et. al*, 2017). O trabalho de Anjos (2015), por exemplo, obteve um valor ainda superior ao encontrado por Almeida (2016), ou seja, 3,85. No trabalho Raposeiras *et. al* (2017), apresentou valores entre 3,6 e 3,8. Para efeito de informação comparativa, o trabalho de Li *et. al* (2020) investigou o uso da escória de ferro e encontrou densidade real dos grãos de 7,9. A distribuição granulométrica do trabalho de Almeida (2016) encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Granulometria de escória de cobre pós-jateada.

% que passa na amostra total	Peneira	Ensaio 01	Ensaio 02	Média
	2"	100	100	100
	1 1/2"	100	100	100
	1"	100	100	100
	3/4"	100	100	100
	3/8"	100	100	100
	n°4	100	100	100
	n°10	99,93	99,95	99,94
	n°16	99,4	99,5	99,45
	n°30	82,34	85,76	84,05
	n°40	62,66	66,47	64,57
	n°60	41,45	44,49	42,97
	n°100	19,86	21,36	20,61
n°200	8,02	7,21	7,62	

Fonte: Almeida (2016)

A CS utilizada no trabalho de Almeida (2016) é a mesma deste trabalho, bem como da pesquisa realizada por Anjos (2015). Nessa última efetuou-se a determinação a finura na peneira de abertura de malha de 0,045 mm, resultando no índice de finura de 45,1%. Esse valor demonstrou-se acima da exigência da norma NBR 12653 (2015), a qual especifica que o material retido nessa peneira deve ter percentual máximo de 34%.

Além disso, Anjos (2015), ao realizar o ensaio de granulometria, apresentou a escória de cobre batida com diâmetro máximo de 1,2 mm e o módulo de finura de 1,55. Dessa forma, notou-se que a CS se enquadra em boa parte da zona granulométrica utilizável prescrita para agregados miúdos, e é totalmente fora de toda a zona ótima.

Antigamente, acreditava-se que a escória era um material perigoso para o meio ambiente, porém, com a Convenção de Basiléia em 1996 e o conhecimento de que a escória a

princípio é feita de materiais essencialmente não perigosos, passou-se a utilizá-la como um recurso substituível para várias indústrias (DHIR *et. al*, 2017).

Um estudo apresentado por Alter (2005), analisou 47 composições químicas da escória de cobre dos Estados Unidos, Canadá, Chile. O resultado dessa pesquisa apresentou valores dos ensaios abaixo do limite do perigo, geralmente 1/5 a 1/10 do valor regulatório. Por essa razão que as escórias são classificadas como não perigosas. O teste de lixiviação estimou que as escórias não perderiam quantidade suficiente de As, Cd, Cr, Pb, ou Se para contaminar as águas subterrâneas.

A capacidade da escória de cobre em reduzir o Cromo VI em soluções aquosas foi investigada. Kiyak *et. al* (1999) verificou que a escória de cobre pode efetivamente reduzir o Cr da solução. Essa redução é de grande medida, a depender da quantidade de ácido presente. Além disso, a eficiência aumentou diminuindo o tamanho da partícula da escória (105 μ) isso pode ser usado para reduzir completamente uma solução de 100 ml de 100mg/l dentro de um período razoavelmente curto de contato).

Dessa forma, Anjos (2015), a fim de classificar a CS quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente, submeteu o material aos processos das normas NBR 10004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004 c) – processos de lixiviação e solubilidade –, sendo caracterizado como resíduo de classe II A, isto é, não inerte, atóxico e não perigoso. Donde concluiu que esses tipos de escórias podem ser reutilizados em indústrias devido as suas propriedades físico-químicas apresentarem baixo risco. Exemplo disso é a sua aplicação na geotecnia, como tratamento do subleito, pavimentação asfáltica, camada de base, camada de sub-base e lastro de ferrovia (KHANZADI E BEHNOOD, 2009). Além disso, alguns artigos incluem uma substituição de agregado nas misturas de concreto (WU, ZANG E MA, 2010).

O uso de agregados de escória de cobre em pavimentos asfálticos de mistura a quente foi investigado por Transportation Research Board, Washington (COLLINS e CIELIESKI, 1994). Na Califórnia, foi utilizada supostamente em pavimentos de asfalto de mistura a quente, já na Geórgia, a escória de cobre granulada foi incorporada a mistura de asfalto.

Kumar (2012) observou que a escória de cobre pós-jateada pode ser utilizada também como agregado fino em mistura asfáltica. No estudo, o autor conclui que um pequeno aumento gradual da escória de cobre como agregado fino na mistura apresenta um aumento na resistência

à flexão. A resistência à abrasão foi observada como sendo menor em relação à amostra controle. A profundidade ao desgaste da amostra aumenta, à medida que a escória é adicionada. Nesse caso, a mistura com 80% desse resíduo aumenta em cerca de 65% a profundidade ao desgaste, em relação a amostra controle.

O uso de escória na pavimentação consiste na utilização parcial ou total de agregados de escória para substituir agregados naturais em misturas asfálticas (WANG, 2016). A qualidade do agregado afeta diretamente a qualidade do produto e por isso a mistura asfáltica depende fortemente das propriedades dos agregados para a estabilidade da mistura.

Raposeiras *et. al* (2017) estudaram a utilização de escória em misturas de asfalto com pavimento asfáltico recuperado (RAP) na tentativa de reduzir problemas de durabilidade devido à perda das propriedades do material ao longo do tempo. Várias conclusões derivaram-se desse estudo, porém as principais delas foram: a presença de escória aumenta a densidade conforme a proporção de CS cresce. Este aumento varia de 3% a 16% em comparação com amostras sem CS. Os resultados de estabilidade apresentam que a escória gera intervalos de valores de estabilidade que são menos dispersos do que na mistura sem esta adição; em altas porcentagens de RAP, a incorporação de SC reduz a estabilidade. Esta diminuição varia entre 15 e 35%. Isso é devido ao baixo atrito das faces das partículas de CS, que têm maior influência que a forma angular das partículas quando excede 30°C; os resultados de fluência apresentam que a CS aumenta os valores desse parâmetro, especialmente para valores de RAP mais baixos (0 a 20%). Quanto maior a quantidade de CS, maior será os valores de fluência.

Gong e Ueda (2018) analisaram-se as propriedades mecânicas residuais e a durabilidade contra o ataque de cloreto do concreto autoadensável contendo agregado fino de escória de cobre após o aquecimento de 400°C. A primeira conclusão foi de que a resistência à compressão residual aumentou após o aquecimento de 300°C com o aumento da temperatura. Além disso, mais microfissuras foram desenvolvidas em torno da face do agregado de escória de cobre e a pasta de cimento quando a temperatura excedeu 200°C.

Lori *et. al* (2021) avaliaram a condutividade hidráulica, a resistência ao impacto e à abrasão do concreto impermeável quando um agregado fino foi substituído por escória de cobre. Como resultados, entende-se que as resistências à compressão e a flexão, bem como a resistência à tração aumentava com o aumento da escória. Com base nos dados coletados dos

ensaios de abrasão a Los Angeles, a substituição de agregado fino por escória de cobre causou um aumento da abrasão e da resistência ao impacto do concreto permeável.

Sharma, Swami e Vyas (2020) analisaram a avaliação do desempenho do mistura asfáltica a quente contendo 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de escória de cobre como substituição parcial do agregado fino. Os resultados dos ensaios do módulo de resiliência apresentaram um aumento de cerca de 13% da mistura com 15% de substituição do agregado fino por escória de cobre em relação a amostra com 0% de substituição. O ensaio da fluência dinâmica apresentou melhoria na resistência até 15% de substituição do agregado fino em relação a SC (escória de cobre). A resistência contra a deformação permanente melhorou 41,66% na mistura com 15% de escória de cobre em comparação com a mistura de controle (0% SC).

Raposeiras *et. al* (2021) realizaram uma pesquisa de mistura de asfalto graduado semidensso com escória de cobre como substituição de agregados, variando os tamanhos das partículas na faixa de 2,5 a 0,08 mm. As peneiras variaram do n° 8 ao n° 200 fornecendo cinco dosagens diferentes. O objetivo do trabalho é determinar o tamanho da escória de cobre com melhor performance. Os resultados mostraram que a escória de cobre em tamanhos mais grossos (peneira de n° 8) e médios (peneira de n° 30 e 50) melhora o desempenho das misturas em comparação com as misturas convencionais. Os autores afirmaram que esses tamanhos absorvem mais rapidamente as mudanças térmicas que a mistura pode sofrer e retardam a mudança de temperatura no aglutinante. Esse tamanho é recomendado para todos os tipos de aplicações, especialmente em áreas com temperaturas altas.

2.4.3 Borra de Petróleo

A borra oleosa de petróleo é composta de metais pesados, óleos, graxas e hidrocarbonetos (ANDRADE, BRITO E MUNIZ, 2014). Ela é gerada no processo de tratamento primário do petróleo, que incluem etapas de armazenamento, transporte e processo de destilação (refinaria).

Em 2018, a Petrobrás produziu 1,5 milhão de barris por dia (bpd) (PETROBRAS, 2018). De acordo com Guimarães *et. al* (2016) estima-se que o volume de borra gerado sobre essa carga refinada seja em torno de 2.940 t.dia⁻¹. Porém, com a expansão das refinarias no Brasil essa carga pode alcançar 8.190 t.dia⁻¹.

A maior parte desses resíduos é descarregada em tanques de retenção, o que remove essas áreas do uso sustentável da terra. Além disso, devido à presença de resíduo químico tóxico, a NBR 10004 (2004), classifica-o como um resíduo classe I-perigoso, portanto, o mesmo não pode ser lançado diretamente no meio ambiente ou comercializado (JIN *et. al.*, 2014; OMM-E-HANY, 2015; EGAZAR'YANTS *et. al.*, 2015).

Contudo, com a expressiva geração desse resíduo, tem crescido o interesse em encontrar métodos alternativos para reutilizá-lo e conseqüentemente oferecê-lo uma melhor destinação. O exemplo disso cita-se a ideia de modificação de asfaltos com borra oleosa, que passou a ser estudada recentemente, porém, conhecem-se os benefícios como redução dos custos de manutenção de rodovias e uma maior resistência à abrasão, envelhecimento e oxidação (FARIAS *et. al.*, 2011).

Dentre os estudos realizados para analisar as propriedades da mistura de asfalto modificado com borra oleosa, destacam-se o trabalho de: Machado e Cardoso (2016).

Machado e Cardoso (2016) apresentaram o comportamento reológico do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) e modificado por via úmida com 20% de borra oleosa. A amostra do CAP 50/70 não modificado se mostrou mais rígida à deformação. As respostas elásticas e viscosas também foram superiores às da amostra do CAP 50/70 modificado.

2.5 MISTURA ASFÁLTICA

Segundo Martinez (2017), misturas asfálticas são aglomerações de agregados pétreos ou areia e ligantes asfálticos que em proporções adequadas garantem requisitos estruturais e funcionais no revestimento de pavimentos flexíveis. Contudo, os ligantes asfálticos exercem grande influência, mesmo sendo a sua porcentagem não superior a 8% do peso total das misturas.

A adesão entre agregado e ligante asfáltico é fator de grande relevância para a durabilidade e o desempenho dos pavimentos. Ela é caracterizada por meio do intertravamento mecânico, adesão física, e interação química, podendo haver a existência dos três processos simultaneamente (VASCONCELOS *et. al.*, 2008).

Os agregados podem ser divididos em naturais ou artificiais. Os naturais são os encontrados em depósitos naturais superficiais, como pedregulhos rolados e areias. Já os

artificiais são aqueles obtidos por meio de britagem de rocha ou seixo rolado (BERTOLLO, 2002). Além disso, os agregados também podem ser classificados de acordo com o seu tamanho, em material de enchimento ou fíler, em miúdo, intermediário ou graúdo.

O fíler é a porção do agregado mineral, geralmente passante na peneira de número #200 (0,075mm de abertura), que ocupa os vazios entre as partículas de agregados graúdos, com o objetivo de reduzir o tamanho desses vazios e aumentar a densidade e estabilidade da mistura asfáltica (BARDINI, 2013).

Quando a porcentagem de fíler aumenta, os vazios do esqueleto mineral diminuem, aumentando a trabalhabilidade da mistura. No entanto, atingido certo nível, os finos começam a interferir na acomodação dos grãos mais grossos e o efeito do afastamento entre as partículas torna-se preponderante, elevando o índice de vazios (FABRO *et. al.*, 2011).

Se a maior parte do fíler tiver partículas maiores que 0,040 mm, elas vão atuar como preenchedores do vazio do esqueleto. Porém, as partículas menores que 0,020 mm atuarão no ligante asfáltico, isto é, incorporando como um filme. Essa mistura é chamada de mástique asfáltico.

As partículas de fíler tem um papel importante no mástique asfáltico, uma vez que essas são responsáveis por 80% da resistência à deformação permanente e os outros 20% são dados pelas propriedades do ligante (FREIRE, BRANCO e VASCONCELOS, 2014). Em contrapartida, Bardini (2013) observou que, à medida que se adicionava fíler ao ligante puro, menor era a habilidade da mistura em resistir ao trincamento por fadiga. Nessa pesquisa, os mástiques que apresentaram maior valor de resistência à fadiga foram compostos por fíler de pó de calcário, enquanto o que apresentou o menor valor foram os compostos com cal hidratada.

2.6 DOSAGEM DE LIGANTE ASFÁLTICO EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem de uma mistura está relacionada a um método de escolha do teor do CAP (cimento asfáltico de petróleo) e da granulometria. O objetivo é produzir uma mistura que possua trabalhabilidade satisfatória e a melhor combinação possível das seguintes propriedades: estabilidade (resistência a deformações permanentes), durabilidade (resistência à desagregação pela ação do tráfego e/ou do intemperismo), flexibilidade (resistência à flexão sob ação de carga retida, sem que haja ocorrência de fissuras), impermeabilidade (resistência à penetração e percolação de água) e resistência ao atrito (BERTOLLO, 2002).

Os métodos mais empregados são o Superpave e o Marshall, sendo o último mais utilizado mundialmente, inclusive no Brasil.

Segundo Senço (1997), o método Marshall foi desenvolvido em 1930 pelo Departamento de Estradas de Rodagem do estado de Mississippi, nos EUA. Ao longo dos anos ele foi adaptado para adequar-se à realidade do aumento de carga de roda e pressão dos pneus dos veículos. Dentre essas modificações, surgiram novos critérios para determinação da quantidade ótima de ligante asfáltico.

Nesse método, a dosagem é feita considerando valores empíricos para estabilidade e fluência. A estabilidade pode ser definida como a capacidade da mistura em deformar-se (plasticamente) pouco sob a ação das cargas. Já a fluência é definida com a deformação sofrida pela mistura compactada quando submetida a uma tensão constante (BERTOLLO, 2002).

O método é realizado através de um compactador que pode ser manual ou mecanizado. Esse último é mais eficaz quanto à frequência de golpes. A norma recomenda 75 golpes em cada face do corpo de prova.

De acordo com a norma DNIT 031 (2006) a composição do mistura asfáltica deve satisfazer os requisitos da Tabela 7.

Tabela 7 – Faixas Granulométricas recomendadas pelo DNIT para mistura asfáltica

Peneira de malha quadrada		% em massa passante			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
1/2"	12,7	-	-	80-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7%
Nº4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5%
Nº10	2	20-40	20-45	22-50	±5%
Nº40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5%
Nº80	0,18	5-20	8-20	4-16	±3%
Nº200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2%
Asfalto solúvel no CS2 (+)(%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	±0,3%

Fonte: Norma DNIT 031 (2006)

Além da norma de granulometria, o método Marshall considera outros parâmetros (ZEGARRA, 2007), tais como:

- *Densidade aparente*: calculada com os corpos de prova do ensaio de dosagem;
- *Densidade máxima teórica da mistura asfáltica*;
- *Porcentagem de vazios do concreto (V_a)*: corresponde ao volume total de pequenas bolsas de ar existentes entre as partículas de agregados recobertos por cimento asfáltico em uma mistura asfáltica compacto em relação ao volume total de vazios;
- *Porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM)*: porcentagem do volume do espaço intergranular de uma mistura asfáltica compacto, que inclui o volume de ar e de asfalto, em relação ao volume total do concreto;
- *Relação de betume/vazio (RBV)*: porcentagem do volume de VAM que é preenchido com cimento asfáltico;
- *Estabilidade*: carga, em kgf, sob o qual o corpo de prova rompe quando submetido à compressão diametral;
- *Fluência*: deformação total, em décimos de milímetro ou centésimos de polegada, que o corpo de prova romper.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

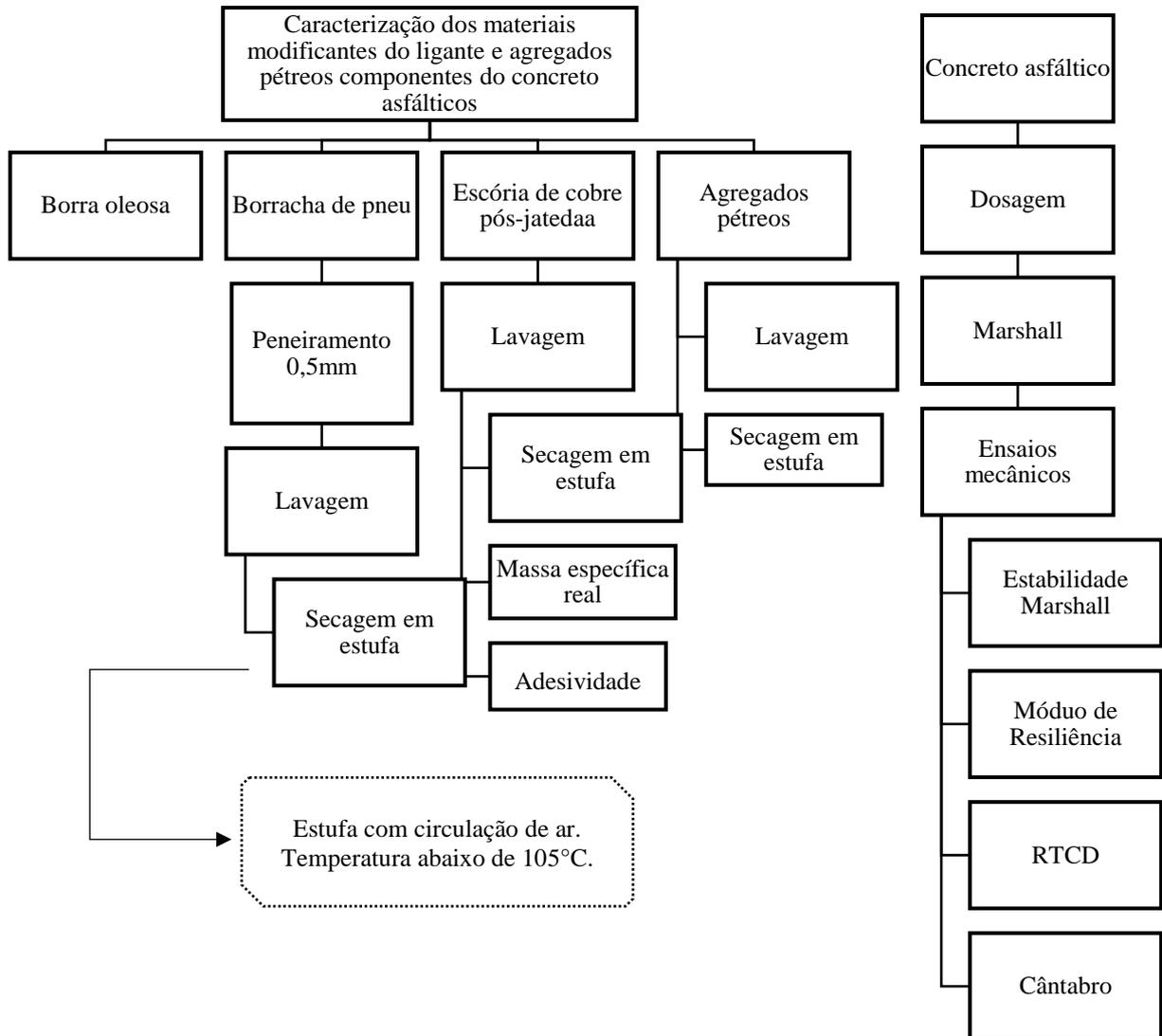
Para a realização desta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais:

- CAP 50/70 – Fornecido pela Emurb – Empresa Municipal de Urbanismo do Município de Aracaju/SE;
- Borracha de recauchutagem de pneu inservível, com granulometria inferior a 0,500 mm, oriunda de empresa de recauchutagem do município de Itabaiana/SE;
- Borra oleosa de Petróleo;
- Escória de cobre pós-jateada (agregado miúdo);
- Agregados minerais graúdos e pó de pedra (*filer*) – Cedidos pela usina de mistura asfáltica da Empresa Municipal de Urbanismo do Município de Aracaju/SE.

3.2 MÉTODOS

A Figura 5 mostra a representação esquemática dos procedimentos experimentais realizados nesta pesquisa.

Figura 5 – Representação esquemática dos procedimentos experimentais realizados



Os métodos utilizados serão os descritos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e Departamento Nacional de Estrada e Rodagem (DNER) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.2.1 Caracterização da borra oleosa

A borra oleosa utilizada nesta pesquisa não foi submetida a ensaios químicos, uma vez que a finalidade do estudo é avaliar a possibilidade do seu uso da mesma forma com que ela sai da indústria. Além disso, o tratamento químico é oneroso, o que torna a sua reutilização na pavimentação uma alternativa econômica.

3.2.2 Caracterização da borracha de pneu

Os processos pelos quais a borracha de pneu foi submetida para uso nesta pesquisa foram os seguintes:

- Peneiramento usando peneira com malha de 0,50mm de abertura;
- Lavagem em água corrente para retirar as impurezas; e,
- Secagem em estufa a 105°C.

3.2.3 Caracterização da escória de cobre pós-jateada

3.2.3.1 Adesividade

Para realizar o ensaio regido pela norma ABNT 12584 (2017) é necessário utilizar um material que passa na peneira 0,600mm e fica retido na peneira 0,210mm.

A mistura foi preparada, em volume, de 71% de agregado e 29% de ligante e em seguida imergiu-se parte do tubo de ensaio com água destilada na solução de glicerina, previamente aquecida no béquer de 600 ml, à uma temperatura de 110°C. Quando a água no tubo ferveu, marcou-se 1 minuto de fervura, e então retirou-se o tubo do banho. No final do ensaio, verificou-se se houve deslocamento da película. Quando não, o ensaio foi repetido utilizando outra mistura de alíquota com concentrações crescentes de carbonato de sódio. Dessa forma, verificou-se qual a concentração da solução se dá a separação ou em qual solução se inicia a separação e em qual termina (Figura 6).

Figura 6 – Aparelhagem empregada no ensaio de adesividade.



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/DEQ/UFS, 2022)

3.2.3.2 *Massa específica real*

Para o ensaio foi utilizado a norma DNIT 411 (2021). Inicialmente peneirou-se a amostra na peneira de 2,0 mm, secou-a até apresentar peso constante em estufa (105°C a 110°C) e tomou-se uma parcela da amostra de 10 g. Após isso pesou-se o picnômetro vazio, seco e limpo (P_1), pesou-se a amostra no picnômetro (P_2), com o picnômetro com água destilada até cobrir e fervido em pelo menos 15 minutos, para expulsar todo o ar existente entre as partículas de solo, deixou-o esfriar em temperatura ambiente. Após isso, encheu-se o picnômetro completamente com água destilada, colocou-o em um banho de água à temperatura ambiente durante 15 minutos e depois de esfriado pesou-o (P_3). Retirou-se todo o material de dentro do picnômetro, lavou-o e encheu-o completamente até que o momento que a água aflorou na sua parte superior. Anotou-se a temperatura de banho e pesou-o (P_4).

A densidade da escória de cobre pós-jateada foi dada pela seguinte fórmula:

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)}$$

Onde:

D_t – Densidade real do agregado à temperatura t ;

P_1 – Peso do picnômetro vazio e seco, em g;

P_2 – Peso do picnômetro mais amostra, em g;

P_3 – Peso do picnômetro mais amostra, mais água, em g;

P_4 – Peso do picnômetro mais água, em g;

O valor da densidade real deve ser referido a temperatura na água de 20°C, como o ensaio foi realizado nessa temperatura, não foi necessário utilizar o fator de correção K_{20} .

3.2.3.3 Caracterização dos agregados minerais

Os agregados pétreos graníticos selecionados - gráudo, intermediário e pó de pedra são caracterizados por Pereira (2020) no quesito massa específica e absorção – DNER 194 (1998) para o pó de pedra e DNER 195 (1997) para agregados intermediários e gráudos, índice de forma – NBR 7809 (2019) e desgaste à abrasão Los Angeles – DNER 35 (1998).

Tabela 8 – Massa específica e absorção de água dos agregados

Materiais	Massa Específica Seca (g/cm³)	Massa Específica da Superfície Saturada Seca (g/cm³)	Absorção (%)
Agregado Graúdo	2,647	2,65	0,33
Agregado Intermediário	2,605	2,597	0,722
Pó de Pedra	2,659	2,673	0,24

Fonte: Pereira (2020)

De acordo com Pereira (2020) os índices de forma dos agregados gráudos foram $b/a=0,77$ e $c/b=0,88$, para as relações de comprimento (a), largura (b) e espessura (c). Dessa forma, o agregado gráudo foi classificado como cúbico, que são os mais recomendados, pois uma vez que são fundamentais no intertravamento dos grãos.

Em relação ao desgaste dos agregados à abrasão, Pereira (2020) realizou esse ensaio tanto para o agregado gráudo, quanto para o agregado miúdo. O agregado intermediário apresentou um maior desgaste à abrasão em cerca de 11,15% em relação ao agregado gráudo.

Porém, ambos se encontram abaixo dos limites exigidos pela norma DNER 035 (1998) que é 50% Tabela 9).

Tabela 9 –Perda de massa por abrasão Los Angeles

Materiais	Abrasão Los Angeles
Agregado Graúdo	11,75%
Agregado Intermediário	13,06%

Fonte: Pereira (2020)

3.2.3.4 Características do CAP 50/70

As características do CAP 50/70 fornecida pelo fabricante é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10 – Características do CAP 50/70 fornecida pelo fabricante.

Características	Unidade	Limite
		CAP 50/70
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	50 a 70
Ponto de amolecimento, min.	°C	46
Viscosidade de Saybolt-Furol		
a 135°C, min.	s	141
a 150°C, min.	-	50
a 177°C	-	30 a 150
Viscosidade Brookfield		
a 135°C, min. SP 21, 20rpm, min.	CP	274
a 150°C, min.	-	112
a 177°C, SP 21	-	57 a 285
Índice de Suscetibilidade Térmica	-	(-1,5) a (+0,7)
Ponto de fulgor, min.	°C	235
Solubilidade em tricloroetileno, min.	% massa	99,5
Dutilidade a 25°C, min.	cm	60
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos		
Varição em massa, máx.	% massa	0,5
Dutilidade a 25°C	cm	20
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8
Penetração retida, min.	%	55

Fonte: ANP (2005)

O CAP 50/70 foi analisado também de acordo com Pereira (2020) em relação ao ensaio de penetração (0,1 mm) - NBR 6576 (1998), ponto de amolecimento mínimo – NBR 6560 (2000) e grau de desempenho, uma vez que é o mesmo ligante desta pesquisa.

Na Tabela 11 estão os resultados obtidos desse estudo e apresentação de que o CAP atende à especificação brasileira de normas técnicas.

Tabela 11 – Penetração, Ponto de amolecimento e Massa específica do CAP 50/70

Ensaio	CAP 50/70	Valores Mínimo recomendados por norma
Penetração (0,1 mm) NBR 6576/2007	50	50 - 70
Ponto de Amolecimento, (°C) - NBR 6560/2016	48	46
Massa Específica (g/cm ³)	1,051	-

Fonte: Perreira (2020)

Os resultados obtidos da caracterização reológica de Pereira (2020) nas três temperaturas determinadas, em 135°C, 150°C e 175°C estão na Tabela 12. Essas três temperaturas estão dentro do limite recomendado pela NBR 15184 (2021).

Tabela 12 – Viscosidade Brookfield do CAP 50/70

Ensaio	CAP 50/70 (cP)	Valores Mínimo (NBR 15184/2021) (cP)
Viscosidade Brookfield, 135° C, SP 21	472	274
Viscosidade Brookfield, 150° C, SP 21	219	112
Viscosidade Brookfield, 175° C, SP 21	101	57 a 285

Fonte: Pereira (2020)

3.2.3.5 Preparação do masterbatch

Para a obtenção do *masterbatch*, primeiro a borra oleosa, previamente pesada, foi aquecida a uma temperatura de (120 ± 5) °C para completo amolecimento. Em seguida, a borracha de pneus inservível foi adicionada à borra oleosa, na quantidade de 15% m/m¹ de borra oleosa em 85% m/m de borracha de pneus inservíveis, sob a agitação mecânica de (100 ± 2) rpm por (40 ± 5) minutos para garantir a completa homogeneização, obtendo-se assim o

¹ m/m – massa/massa

masterbatch 15/85% m/m. Em seguida, esse último foi moldado na forma de briquetes a serem adicionados na quantidade de 10% m/m da massa de finos junto com o ligante no processamento do mistura asfáltica.

3.2.3.6 Dosagens das misturas asfálticas (determinação do teor de ligante de projeto)

Nesta pesquisa foi realizada a dosagem Marshall com CAP 50/70 não modificado e modificado com 10% massa/massa de *masterbatch* de borra oleosa e borracha de pneu, na proporção 15/85% massa/massa e tendo como agregado miúdo a escória de cobre pós-jateada pelo processo de via seca.

A substituição parcial do agregado miúdo por escória de cobre pós-jateada foi de 5% massa/massa. Porcentagem recomendada por Muñoz Caceres *et. al* (2021), que afirma a eficácia da substituição em percentuais de até 15% massa/massa.

Após a determinação dos parâmetros necessários para a moldagem dos corpos de prova, iniciou-se a desmoldagem e determinou-se a massa seca (M_s) e submersa em água (M_{sub}). Com esses valores foi possível obter a massa específica aparente (G_{mb}), que por comparação com a massa específica máxima teórica (DMT), pôde-se obter as relações volumétricas típicas da dosagem.

O cálculo do DMT, equação (1), foi realizado através da ponderação das massas específicas de todos os materiais que constituem o mistura asfáltica. Com o DMT é possível calcular os parâmetros volumétricos de volume de vazios, vazios com betume, vazios do agregado mineral e relação betume/vazios.

$$DMT: \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Ai}{G_{Ai}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%Pó}{G_{Pó}}} \quad (1)$$

Onde:

%a, %Ag, %Ai, %Am e %Pó – São, respectivamente, porcentagens referentes ao asfalto, agregado graúdo, agregado intermediário, agregado miúdo e pó de pedra presente na mistura;

Ga, GAg, GAi, GAm e GPó – São, respectivamente, massa específica do ligante asfáltico, do agregado graúdo, agregado intermediário, agregado miúdo e pó de pedra presente na mistura.

Após obter as massas específicas dos agregados e do ligante, o teor inicial de ligante foi de 5% massa/massa, como recomendado em norma. Dividiu-se em grupos, e cada grupo teve no mínimo 3 CP's. O primeiro grupo é referente a 5% massa/massa de ligante asfáltico, já os outros grupos são referentes a valores acima (5,5%, 6,0% e 6,5% massa/massa) e abaixo (4,0% e 4,5% massa/massa). Dessa forma, foram executados 18 corpos de prova para o CAP 50/70 não modificado e 18 corpos de prova para o CAP 50/70 modificado por via seca, totalizando 36 corpos de prova. Os agregados junto com o ligante formaram corpos de prova com cerca de 1200 g e 63,5 mm de altura. O número de golpes foi 75 de cada lado do corpo de prova. A Figura 7 mostra os CP's utilizados na dosagem Marshall para o CAP 50/70 não modificado.

Figura 7 – CP's utilizados na dosagem Marshall CAP 50/70 modificado em estudo.



Fonte: Bancada do Laboratório de Topografia e Transportes (LTT/DEC/UFS, 2022)

O teor de projeto definido para ambas as misturas considerou o intervalo de relação de betume/vazios (RBV) 75% a 82% e o volume de vazios (VV) no intervalo de 3% a 5%, de acordo com a norma do DNIT 031 (2006).

3.2.3.7 CAP 50/70 modificado e não modificado

Após a determinação do teor de projeto é necessário moldar a mistura para os ensaios laboratoriais.

O preparo da mistura é o mesmo da determinação do teor de projeto, uma vez que está de acordo com norma DNER – ME 043 (1995) segue o procedimento:

- I. Preparar o *masterbatch* na proporção de 15% (m/m) e 85% (m/m) de borracha de pneu e borra oleosa de petróleo, respectivamente/
- II. Pré-aquecer os agregados e escória de cobre pós-jateada à 166°C;
- III. Pré-aquecer o CAP 50/70 a 156°C;
- IV. Preparar a mistura asfáltica com a homogeneização dos agregados pétreos, ligante asfáltico e *masterbatch*.

As temperaturas utilizadas nas misturas do CAP 50/70 não modificado e modificado são apresentadas na Tabela 13 e foram obtidas por meio da curva de viscosidade do CAP 50/70 *versus* temperatura.

Tabela 13 – Temperatura do processamento da mistura

CAP 50/70	Ligante (°C)	Agregados (°C)	Compactação (°C)
Não modificado e modificado	156	166	143

A Figura 8 apresenta a fotografia sequencial dos aparelhos utilizados na execução dos CP's.

Figura 8 – Fotografia sequencial dos aparelhos utilizados na execução dos CPs.



Em seguida, após o processo de compactação e desmolde, os corpos de prova foram resfriados em temperatura ambiente e, assim, realizou-se as medidas de altura e diâmetro, massa seca e massa submersa. Com esses valores foi possível se obter os parâmetros volumétricos.

3.2.3.8 Densidade e absorção dos corpos de prova

Após o processo de dosagem das amostras determinou-se a densidade relativa aparente e a massa específica dos corpos de prova compactados. De acordo com a norma do DNIT 428 (2022), inicialmente, determinou-se a massa do corpo de prova após ter permanecido em temperatura de 25°C por no mínimo 2 horas, medida A. Após isso, submergiu-se o corpo de prova por um período de 3 a 5 minutos para determinar a pesagem hidrostática, a sua massa de água, medida B.

Depois de remover o corpo de prova do banho e o secado rapidamente e superficialmente, determinou-se a massa exposta ao ar, medida C.

A porcentagem de água absorvida pelo corpo de prova é:

$$\% \text{ de água absorvida} = 100 \times \frac{(C - A)}{(C - B)} \quad (2)$$

Onde:

A é a massa do corpo de prova seco, em gramas;

B é a massa do corpo de prova submerso na água, em gramas;

C é a massa do corpo de prova seco, em gramas;

3.2.4 Ensaios mecânicos

Após definido o teor de ligante do projeto, foram confeccionados 3 corpos de prova para cada tipo de ensaio abaixo, totalizando 24 corpos de prova dosados pelo método Marshall, para o ligante não modificado e modificado por via seca.

3.2.4.1 Estabilidade e fluência Marshall

De acordo com a norma DNER ME 043 (1995), a estabilidade é definida como a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo de prova, expressa em N (kgf). Já a fluência é definida como a deformação total apresentada pelo corpo de prova, no momento da aplicação da carga máxima, expressa em décimos de milímetro.

Para determinar a estabilidade Marshall os corpos de prova foram submetidos em banho-maria a 60°C, por um período de 30 a 40 minutos. Em seguida, colocados no molde de compressão, a temperatura de 21°C a 38°C, posicionados na prensa, juntamente com o medidor de fluência.

A prensa utilizada para romper os corpos de prova foi o modelo I-2001-A, prensa Marshall elétrica com anel dinamométrico com capacidade de 5.000 Kgf e extensômetro de resolução 0,001 mm, da CONTENCO Ind. e com. LTDA, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Prensa Marshall o modelo I-2001-A - CONTENCO



Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimento (GEOPAV/DEC/UFS, 2022)

A prensa foi operada de tal modo que o seu êmbolo se elevou a uma velocidade de 5 cm por minuto, até o romper o corpo-de-prova. A carga em N (kgf), necessária para produzir o

rompimento do corpo de prova, foi anotada como “estabilidade lida”. Esse valor foi corrigido multiplicando-se por um fator (f), que é função da espessura do corpo-de-prova.

$$f = 927,23h^{-1,64} \quad (3)$$

Onde:

f – Fator;

h - Espessura do corpo-de-prova, em centímetros.

Já o valor de fluência foi obtido simultaneamente ao valor de estabilidade, uma vez que durante a aplicação de carga o medidor de fluência é firmado.

3.2.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral é especificada pela norma do DNIT 136 (2018), que espera no mínimo um valor de 0,65 MPa. De acordo com Bernucci *et. al* (2008), a aplicação de forças se dá através de frisos metálicos de 12,7 mm de largura e curvatura adequada ao corpo-de-prova cilíndrico.

Ao iniciar o ensaio, mediu-se a altura (h) e diâmetro (d) dos corpos de prova com o paquímetro, em quatro posições diferentes. Por conseguinte, colocou-se os CP's a temperatura controlada de $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$, por um período de 4 h, antes da realização do ensaio.

Após esse período, os CP's foram colocados no dispositivo centralizador (Figura 10) e aplicada uma carga vertical de $(0,8 \pm 0,1)$ mm/s até que houvesse a ruptura completa.

Figura 10 – Prensa elétrica usada no Ensaio de RTCD



Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimento (GEOPAV/DEC/UFS, 2022)

Por fim, o valor da carga de ruptura foi anotado e o valor da resistência à tração foi determinado através da equação (4):

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH} \quad (4)$$

Onde:

σ_r – Tensão de Resistência à tração, MPa;

F – Carga de ruptura, N;

D – Diâmetro do corpo-de-prova, mm;

H – Altura do corpo-de-prova, mm.

O resultado da resistência à tração foi a média dos três CP's em MPa.

3.2.4.3 Módulo de Resiliência

O ensaio do módulo de resiliência para misturas asfálticas é especificado pela norma do DNIT 135 (2018). Ele consiste em uma carga compressiva em formato de onda que pulsa de forma repetida no plano diametral vertical no corpo de prova cilíndrico e ocasiona uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação. Dessa forma, pode-se saber o deslocamento diametral recuperado na direção horizontal, que corresponde à tensão gerada.

A carga de ensaio aplicada está entre 5% e 25% da resistência à tração por compressão diametral média obtida. Após um período de armazenamento, o corpo-de-prova foi colocado no dispositivo de carregamento e centralizado (Figura 11). O CP foi condicionado aplicando 50 ciclos de carga, e após esse condicionamento aplicou-se mais 15, registrando taxa de aquisição mínima de 200 pontos por segundo. A carga inicial foi aumentada em 5% e o procedimento foi repetido.

Figura 11 – Equipamento usado na medida do módulo de resiliência. Modelo: SEMBS



Fonte: Laboratório de Topografia e Transportes . (LTT/DEC/UFS, 2022)

Os valores foram comparados entre si e o resultado é a média dos valores encontrados em MPa.

3.2.4.4 Desgaste por abrasão - Cântabro

A fim de analisar a coesão da mistura betuminosa, foi analisado o percentual de desgaste Cântabro do corpo de prova. Esse método, corroborado pela norma DNER-ME 383 (1999), tem por objetivo medir o desgaste por abrasão de misturas asfálticas. O ensaio consiste em submeter a amostra a 300 revoluções (33 rpm), a uma temperatura de 25° C, na máquina de abrasão a Los Angeles, sem as esferas metálicas (Figura 12).

Figura 12 – CP's de amostras não modificadas (PR) e modificadas (5,3) após ensaio de abrasão - Cântabro



Fonte: Laboratório de Geotecnia e Pavimento(GEOPAV/DEC/UFS, 2022)

O percentual de abrasão é determinado num corpo de prova Marshall pela diferença de massa inicial e sua massa final.

$$A = \frac{M_o - M_f}{M_o} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

A – Desgaste da mistura asfáltica com asfalto modificado, %;

M_o – Massa do corpo de prova antes do ensaio, em gramas;

M_f – Massa do corpo de prova após o ensaio, em gramas;

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

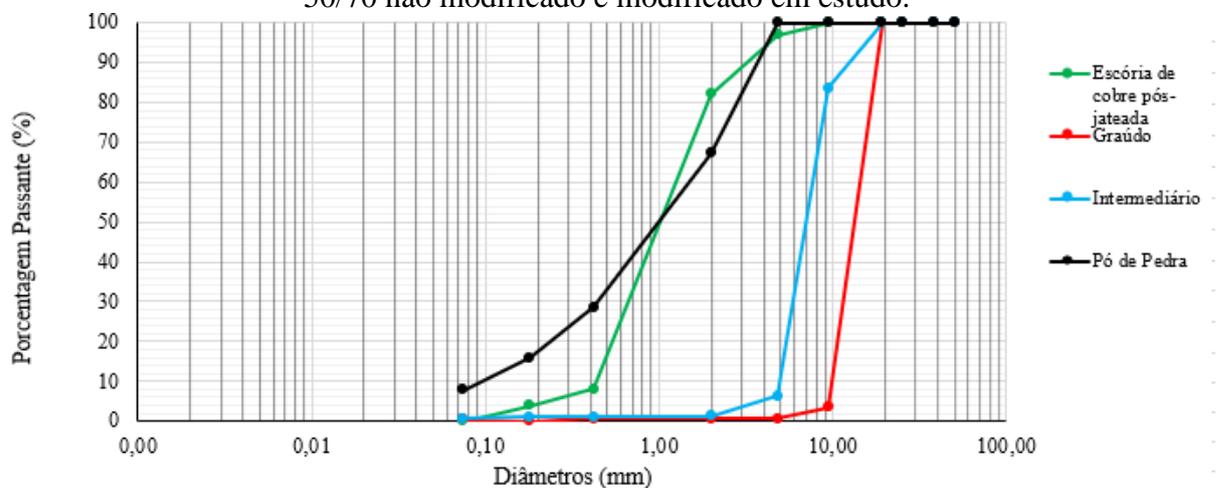
Neste capítulo são apresentados os resultados e análises da caracterização dos agregados, bem como os ensaios mecânicos da mistura asfáltica com ligante não modificado e modificado com 10% de *masterbatch* de borra oleosa e borracha de pneu de recauchutagem na proporção de 15/85 m/m por via seca.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Caracterização dos agregados

A Figura 13 mostra a distribuição granulométrica dos agregados utilizados. Foram adotadas as porcentagens, massa/massa, de 20%, 35%, 40% e 5% de agregado graúdo, intermediário, pó de pedra e escória de cobre pós-jateada, respectivamente, para a mistura asfáltica do CAP 50/70 não modificado e modificado em estudo.

Figura 13 – Curva granulométrica dos agregados utilizados no mistura asfáltica com CAP 50/70 não modificado e modificado em estudo.



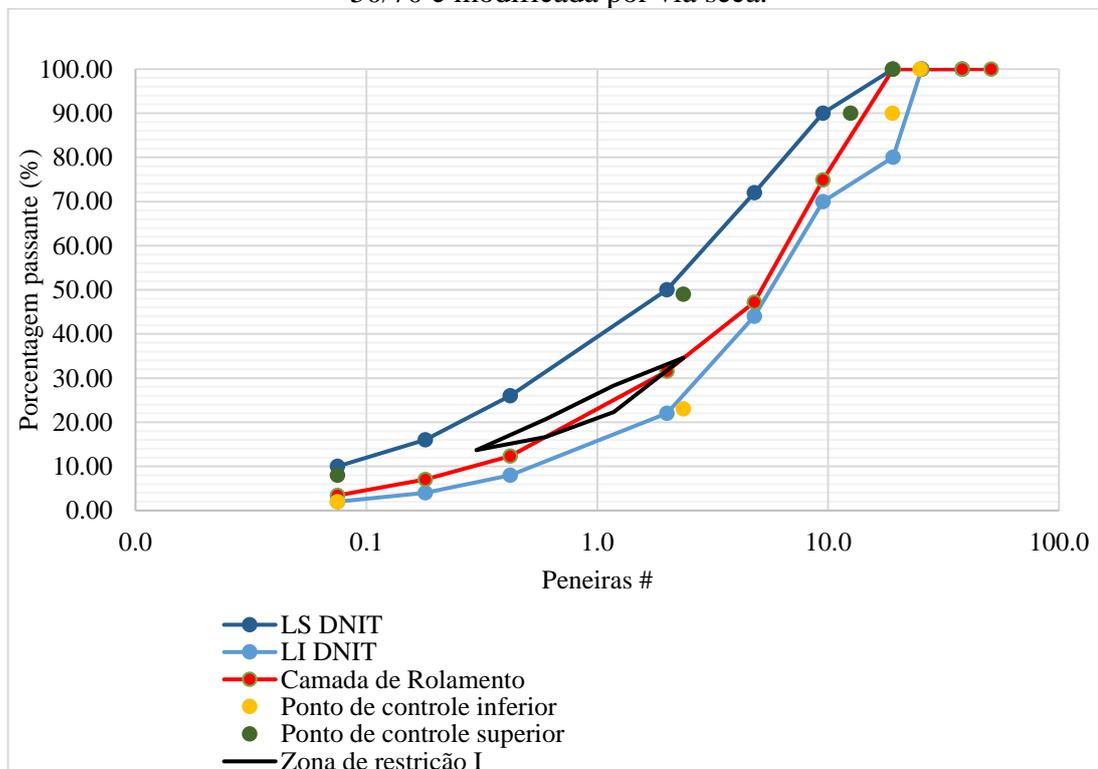
A Tabela 14 apresenta os resultados da porcentagem passante em cada peneira dos agregados utilizados nas misturas.

Tabela 14 – Resultados da análise granulométrica dos agregados da pesquisa.

Peneiras		Agregados (%)			Escória de cobre pós-jateada (%)
POL	mm	Graúdo	Intermediário	Pó de Pedra	
2	50,8	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8	9,5	3,40	83,54	100,00	100,00
004	4,8	0,61	6,33	99,97	97,00
010	2,0	0,57	1,36	67,27	82,00
040	0,42	0,53	1,16	28,51	8,00
080	0,18	0,51	1,05	16,02	4,00
200	0,075	0,33	0,67	7,82	0,00

A Figura 14 mostra a curva adotada para a mistura asfáltica de CAP 50/70 não modificado e modificado com por via seca. As porcentagens sugeridas nesta pesquisa se encaixam na distribuição granulométrica na faixa C do DNIT – camada de rolamento.

Figura 14 – Curva adotada e os limites da faixa C do DNIT para a mistura asfáltica de CAP 50/70 e modificada por via seca.



4.1.2 Caracterização da escória de cobre pós-jateada (ECPJ)

A Tabela 14 apresenta as porcentagens da escória que passam nas respectivas peneiras. A granulometria revelou que a escória se apresenta praticamente como uma areia (82,0%). Essa grande quantidade de material de fração de areia média e fina, além da porcentagem de material passante na peneira #200 (0,00%), contribuem para a não plasticidade da escória.

A classificação da escória de cobre em estudo, segundo a metodologia dos sistemas AASHTO/TRB e SUCS foi A-1-b (com índice de grupo 0) e SP, respectivamente. As características do grupo A-1-b inclui os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado. Para o grupo SP a designação característica é de areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.

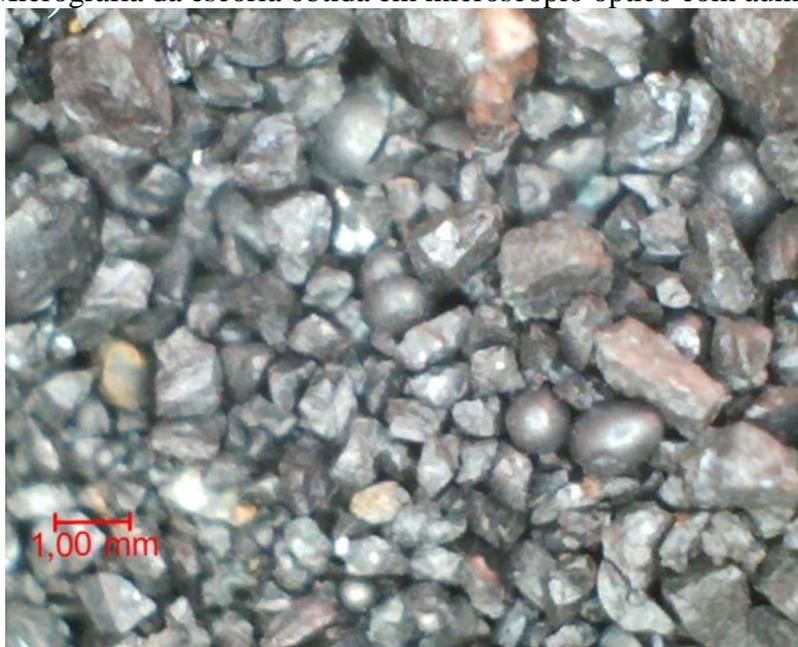
Na Tabela 15 encontra-se o resultado do peso de cada etapa do ensaio de densidade real realizada com a escória de cobre pós-jateada. A densidade real da escória utilizada foi $3,87 \text{ g/cm}^3$ e este parâmetro está associado aos minerais constituintes dela, isto é, a quantidade de óxido de ferro presente na escória, além da quantidade que se desprende da superfície metálica no processo de jateamento abrasivo. Para a escória pós-jateada do trabalho de Almeida (2016), utilizada no mesmo tanque do processo de abrasão, o valor obtido foi um pouco inferior ao desta pesquisa, ou seja, $3,73 \text{ g/cm}^3$. Já Anjos (2015) encontrou um valor um pouco maior que Almeida (2016) e um pouco menor que o desta pesquisa, $3,85 \text{ g/cm}^3$. Como a escória possui uma densidade substancialmente maior, o rejeito é enquadrado como um agregado pesado de acordo com os preceitos da norma NBR 9935 (2011).

Tabela 15 – Resultado do ensaio de densidade real da escória de cobre pós-jateada.

Massas			Densidade Real
P1	Massa do Picnômetro Vazio	23,868	3,872
P2	Massa do Picnômetro + Amostra	60,5729	
P3	Massa do Picnômetro + Amostra + Água	79,6044	
P4	Massa do Picnômetro + Água	52,3788	

Ao analisar a escória utilizada em um microscópio óptico com aumento de 200 vezes é possível ver a morfologia irregular dos grãos em sua maioria angulosos (Figura 15). Essas mesmas características são reportadas na literatura (GORAI e JANA, 2003; ZAIN *et. al*, 2004; AL-JABRI, AL-SAIDY, TAHA, 2011). Inicialmente, o formato irregular das partículas pode ser favorável ao aumento de resistência das misturas, devido ao melhor intertravamento dos agregados e escória.

Figura 15 – Micrografia da escória obtida em microscópio óptico com aumento de 200x.



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/DEQ/UFS, 2022)

Nota-se ainda que na Figura 15, com uma lente de aumento de 200 vezes, é possível ver uma superfície lisa e isenta de poros, como também observado por Almeida (2016). No trabalho de Anjos (2015), ao utilizar essa mesma escória, encontrou-se uma absorção de 0,33%, o que confirma o nível baixo de absorção devido a uma baixa porosidade também presente nos grãos.

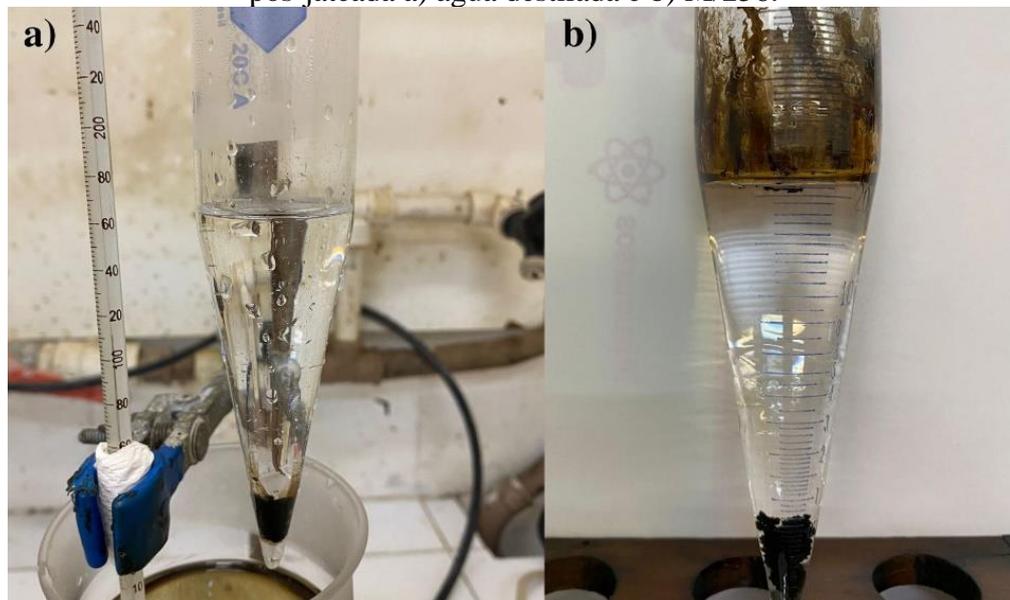
No ensaio de adesividade, procedimento que analisa a propriedade de o agregado ser aderido por material betuminoso, é verificado um descolamento da película betuminosa que recobre o resíduo a partir da solução de carbonato de n°1 (Tabela 16). O ensaio foi inicialmente realizado com a água destilada, a qual não apresentou descolamento. Após os dois procedimentos, o ensaio continuou sendo realizado para as outras soluções, porém, ainda assim, obteve o mesmo resultado da solução n° 1 – ligante descolado.

Tabela 16 – Resultado do ensaio de adesividade na presença de carbonato de sódio.

Solução de Carbonato de Sódio	Molaridade	CAP 50/70
n° 0	Água Destilada	Não Descolou
n° 1	M/256	Descolou
n° 2	M/128	Descolou
n° 3	M/64	Descolou
n° 4	M/32	Descolou
n° 5	M/16	Descolou
n° 6	M/8	Descolou
n° 7	M/4	Descolou
n° 8	M/2	Descolou
n° 9	M	Descolou

Na Figura 16 observa-se o comportamento do ligante com a escória de cobre pós-jateada no final do ensaio com solução de n° 0 (água destilada) e n° 1 (M/256). Na Figura 16-a, percebe-se a solução transparente, isto é, sem nenhum sinal de descolamento do ligante. Porém, na Figura 16-b é perceptível a lâmina de betume que descolou da escória, ou seja, a separação dos dois materiais. Dessa forma, pode-se afirmar o valor da adesividade é 1 e, de acordo com a norma, o deslocamento apresenta adesividade satisfatória.

Figura 16 – Fotografia da aparelhagem usada no ensaio de adesividade da escória de cobre pós-jateada a) água destilada e b) M/256.



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/DEQ/UFS, 2022)

A amostra de escória também foi submetida ao ensaio de adesividade de Norma DNER-ME 078 (1998) como método alternativo. O ensaio normatizado para o agregado graúdo baseia-se na verificação a partir do descolamento do ligante depois de imerso em água e mantido

durante 72 horas em estufa a uma temperatura de 40°C (Figura 17). Após o ensaio, percebeu-se que não houve descolamento visível da película de ligante e agregado.

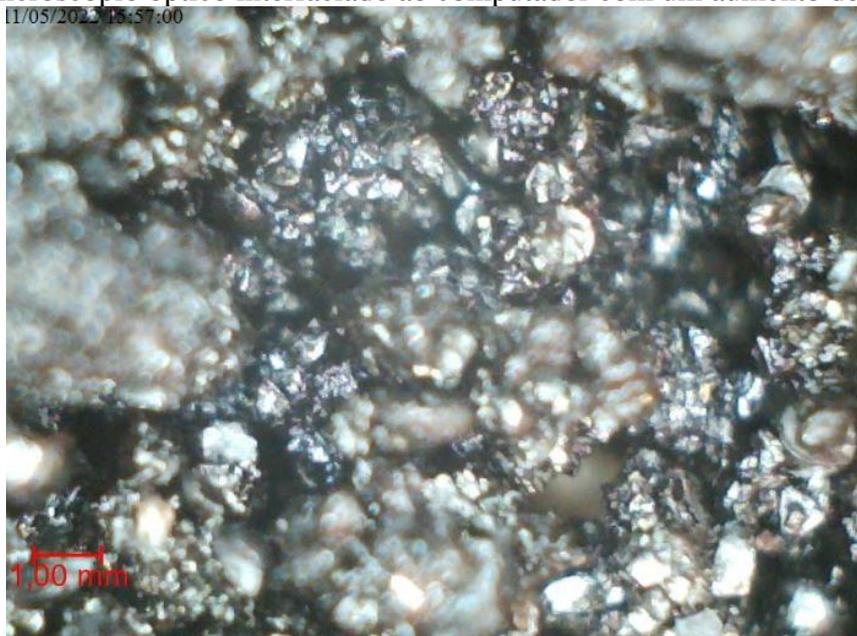
Figura 17 – Fotografia da aparelhagem usada no estudo de adesividade da escória de cobre pós-jateada de acordo com a norma de agregado graúdo – DNER-ME 078 (1998).



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/DEQ/UFS, 2022)

A amostra do ensaio também foi submetida a uma melhor análise via microscópio interfaciado ao computador – CAM DIG USB – modelo QC3247. Na Figura 18, observa-se que a escória está recoberta com uma lâmina de betume mesmo após o procedimento normativo. Dessa forma, conclui-se que o agregado apresenta adesividade satisfatória.

Figura 18 – Micrografia de escória de cobre pós-jateada após o ensaio de adesividade obtida em microscópio óptico interfaciado ao computador com um aumento de 200x.



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/UFS, 2022)

4.2 DOSAGEM MARSHALL

A Figura 19 e a Figura 20 mostram o gráfico do teor de ligante de projeto Volume de Vazios (VV) (%) versus Relação Betume/Vazios (RBV) (%) com todos os valores obtidos dos seguintes teores de asfalto: 3,5% (para o CAP 50/70 não modificado), 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% e 7,0% (para o CAP 50/70 não modificado). O método aplicado depende das linhas de tendências traçadas para os valores encontrados dos dois parâmetros. A partir da interseção da linha e com os limites respectivos (3-5 para Vv% e 75-82 RBV%) são determinados quatro teores de CAP, o teor ótimo é a média dos dois centrais. O resultado apresentou que o teor de ligante de projeto é 6,82% para o CAP 50/70 não modificado e 5,30% para o CAP 50/70 modificado por via seca.

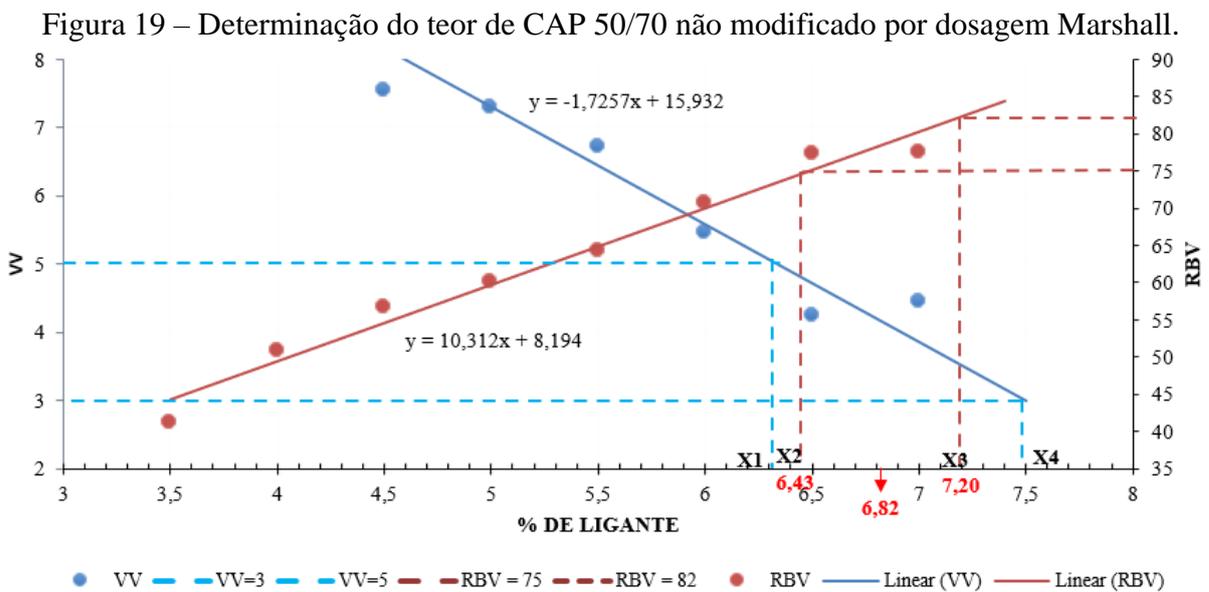
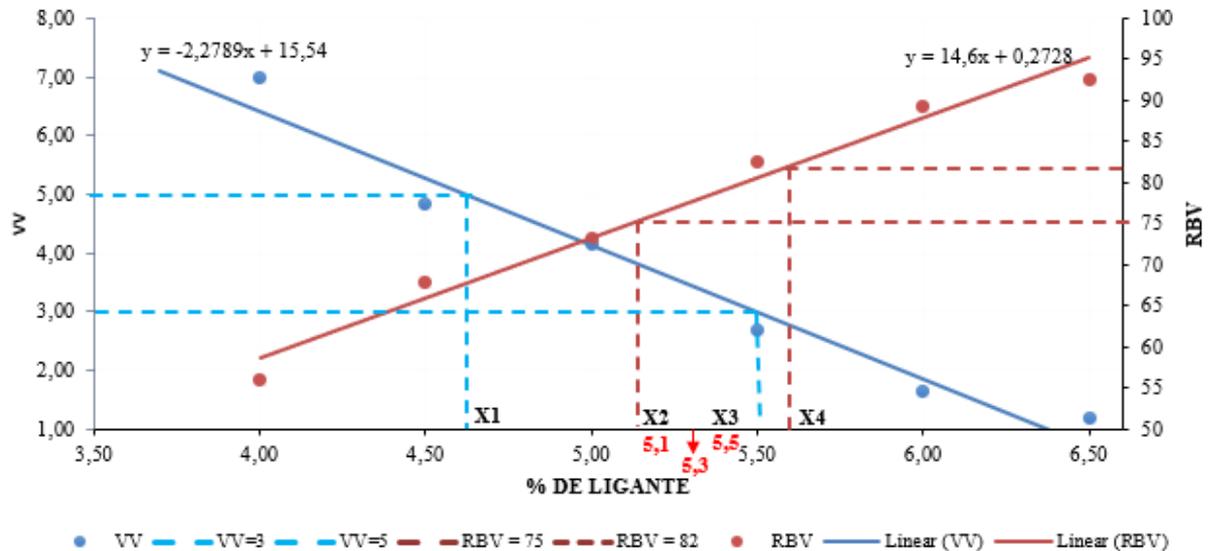


Figura 20 – Determinação do teor de CAP 50/70 modificado, por via seca, por dosagem Marshall.



Na pesquisa de Santana (2016) e Pereira (2020) utilizou-se o mesmo CAP 50/70 modificado com *masterbatch* de borra oleosa e borracha de pneu por via úmida e via seca, respectivamente. O teor obtido por ambos foi de 6,10%. A diferença entre os percentuais desta pesquisa e do encontrado por Santana (2016) e Pereira (2020) dá-se em função da granulometria das misturas, uma vez que este trabalho inseriu a escória de cobre pós-jateada em substituição parcial do agregado miúdo. Ao comparar com o resultado da Figura 20, isto é, 5,3%, percebe-se que a escória de cobre proporcionou uma melhor molhabilidade da mistura, uma vez que preenche os espaços vazios presentes na mistura. Dessa forma, quanto menor for os espaços vazios, menor será o teor de ligante de projeto.

Uma outra comparação é a curva granulometria utilizada na mistura que impacta diretamente no teor de ligante do projeto. A distribuição granulométrica dos agregados utilizados na pesquisa de Pereira (2020) foi de 10%, 46% e 44% de agregado graúdo, intermediário e pó de pedra, respectivamente. Nesse caso, a porcentagem de pó de pedra foi maior do que o utilizado nesta pesquisa, isto é, 40%. Bardini (2013) observou o comportamento em relação à diminuição do teor de ligante de projeto para teores maiores de fíler. Em função da maior superfície específica da matriz do agregado pétreo com maior teor de fíler, esperava-se que fosse necessário maior teor de ligante para envolver adequadamente essas partículas, porém, os ensaios não confirmaram esse comportamento.

A Tabela 17 mostra o resumo dos valores de RBV, VV e teor de ligante encontrados para o CAP 50/70 não modificado, CAP 50/70 modificado e CAP 50/70 modificado por Pereira

(2020). Os resultados corroboram ao fato de que a modificação aumenta a molhabilidade/trabalhabilidade da mistura, facilitando a manipulação e o espalhamento do ligante entre os agregados pétreos.

Tabela 17 – Resultados da dosagem do CAP 50/70 não modificado, modificado e CAP 50/70 modificado por Pereira (2020)

Variáveis	CAP 50/70 não modificado	CAP 50/70 modificado	CAP 50/70 modificado (Pereira, 2020)
RBV	78,50%	78,50%	80,37%
VV	4,16%	3,46%	3,52%
Teor do ligante	6,82%	5,30%	6,10%

Dessa forma, pode-se afirmar que o CAP 50/70 modificado apresenta um menor VV (%) e um menor teor de ligante (%), isto é, o modificador promove que o ligante tenha uma melhor distribuição entre os agregados e por isso preenche melhor os espaços vazios presente na mistura.

4.3 DENSIDADES E ABSORÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Na Tabela 18 são mostrados os valores de absorção, densidade relativa aparente e massa específica aparente obtidos na presente pesquisa, com os corpos de prova das misturas com CAP 50/70 não modificado e modificado por via seca. Da tabela, observa-se que a amostra modificada apresentou absorção de água de aproximadamente 78,16% massa/massa maior em comparação com amostra de ligante CAP 50/70 não modificado.

Tabela 18 – Densidade e absorção dos corpos de prova do ligante modificado, por via seca, e não modificado.

CAP 50/70	Absorção (%)	Densidade Relativa Aparente (%)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)
Modificado	3,48	2,27	2,26
Não modificado	0,76	2,35	2,34

Observa-se que na mistura asfáltica com o CAP 50/70 modificado, a massa específica aparente é ligeiramente inferior à massa específica aparente da mistura asfáltica processada com o ligante não modificado. Segundo Cao (2007) isso poderia acontecer devido à massa específica da borracha ser menor do que dos agregados pétreo. O que faz com que a densidade relativa e,

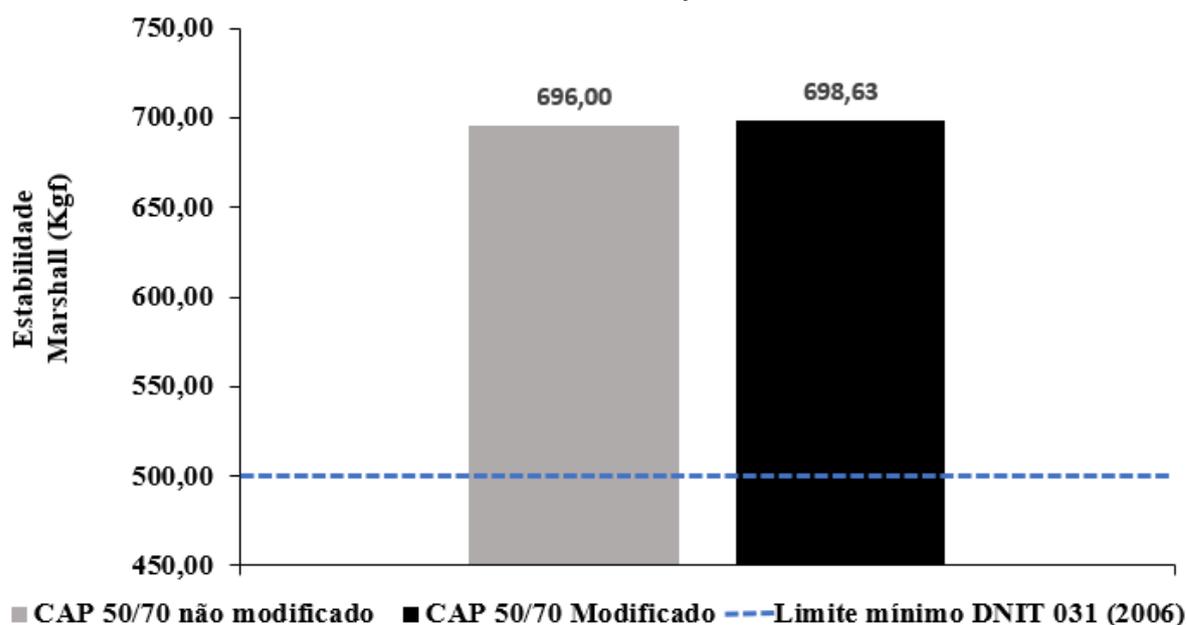
consequentemente, a massa específica da mistura asfáltica diminua, à medida que uma maior porcentagem de borracha é adicionada ao ligante asfáltico.

4.4 ENSAIOS MECÂNICOS

4.4.1 Estabilidade Marshall

O principal uso da estabilidade Marshall tem sido a avaliação de sua variação em função do teor de ligante. Ela é uma medida indireta da pseudoviscosidade da massa asfáltica, afetada significativamente pelo atrito interno da mistura e pela viscosidade do ligante na temperatura de ensaio (ROBERTS *et. al*, 1996). A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** mostra graficamente os valores de estabilidade Marshall do CAP 50/70 não modificado e modificado por via seca. Observa-se da figura que as duas misturas apresentaram valores superiores a 500 kgf, considerado o menor valor estabelecido pela norma do DNIT 031 (2006). Além disso, a estabilidade Marshall obtida com o uso do CAP 50/70 modificado por via seca apresentou valor superior ao CAP 50/70 não modificado, embora tenha sido muito discreta a diferença percentual (0,4% apenas).

Figura 21 – Resultado de estabilidade Marshall de misturas asfálticas com ligante não modificado e modificado por via seca.



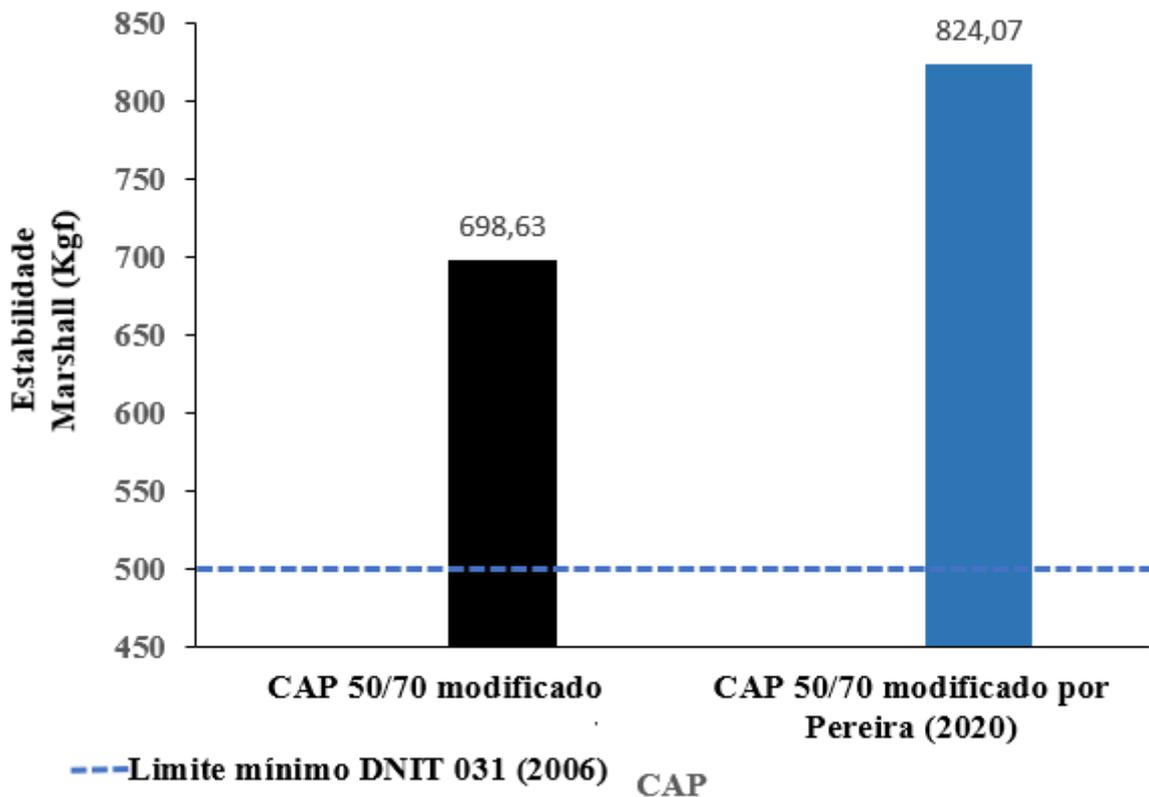
O aumento, ainda que muito pouco, dos valores de estabilidade Marshall ao se adicionar escória de cobre não jateada às misturas asfálticas também ocorreu na pesquisa de Ziari *et. al* (2017). Vale ressaltar que a presente pesquisa se baseou na incorporação da escória de cobre à

mistura em substituição aos agregados nas misturas de CAUQ. Os resultados indicaram que à medida que a escória de cobre era adicionada, o valor da estabilidade Marshall aumentava de maneira discreta, até a porcentagem de 10% de substituição. Após essa porcentagem os resultados aumentavam substancialmente, promovendo um acréscimo de cerca de 25% em relação a amostra controle.

Cabe mencionar que, conforme Oliveira *et al.* (2020) e Alfayez *et al.* (2020), espera-se que o CAP modificado promova maiores ganhos nos valores da estabilidade quando a modificação é feita com borracha. Isso é justificado com base no fato de que a borracha tem a capacidade de proporcionar maior rigidez à mistura asfáltica. De mesmo modo, Xie *et al.* (2019) relatou que o uso de borracha de pneu como modificador do ligante asfáltico aumentou a rigidez em diferentes temperaturas.

Os resultados obtidos da mistura asfáltica modificada pelo processo de via seca apresentaram valores menores, quando comparados com os estudos de Pereira (2020), tal como apresentada nos gráficos da **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**, para efeitos comparativos. Como ambas as modificações foram feitas por via seca, com o diferencial da escória de cobre como agregado miúdo, é possível que a distribuição granulométrica tenha proporcionado uma melhor coesão para a mistura de Pereira (2020).

Figura 22 – Resultado de estabilidade Marshall da mistura asfáltica modificada por via seca e da mistura modificada por via seca apenas com borracha de pneu e borra oleosa.



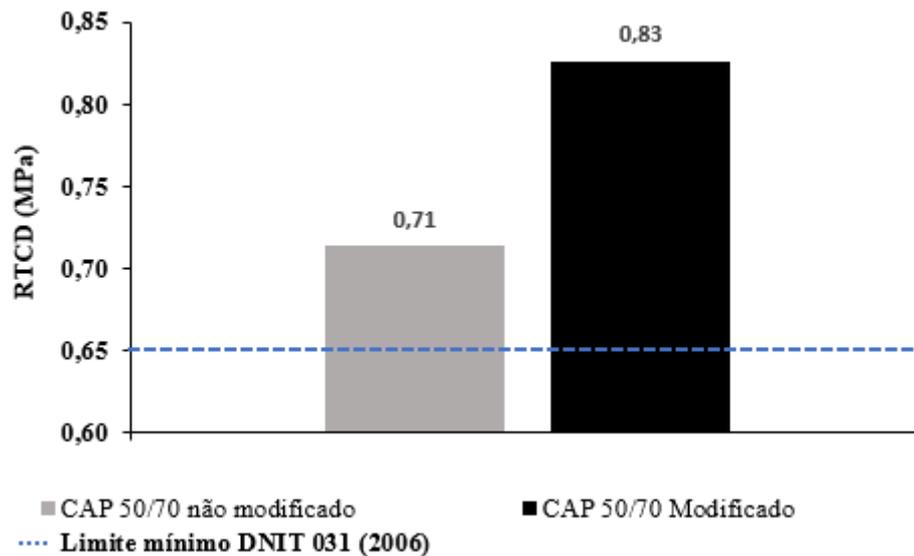
Como apresentado na caracterização dos agregados, a porcentagem utilizada de agregado graúdo e fíler de pó de pedra nesta pesquisa é 20% e 40%, respectivamente. Em contrapartida, no trabalhado de Pereira (2020), utilizou-se 10% de agregado graúdo e 44% de fíler de pó de pedra. Percebe-se que a quantidade de agregado graúdo é menor na pesquisa de Pereira (2020), ao passo que a mesma tem uma porcentagem maior de pó de pedra. Entende-se que quando a porcentagem de fíler aumenta, isto é, do pó de pedra, os vazios do esqueleto mineral diminuem, isto é, ele ocupa os vazios entre as partículas de agregados graúdos (FABRO *et. al*, 2011). Dessa forma, entende-se que a escória de cobre por ter grãos maiores diminuiu a estabilidade do CAP 50/70 modificado.

No entanto, mesmo com uma estabilidade Marshall menor que o CAP 50/70 modificado por Pereira (2020), os resultados obtidos para o ensaio mecânico de estabilidade, tanto para o CAP 50/70 não modificado, quanto o CAP 50/70 modificado por via seca, satisfaz o limite mínimo exigido em norma.

4.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral da amostra não modificada e modificada por via seca estão representados na Figura 23. Ao analisar os valores, percebe-se que o CAP 50/70 modificado obteve um resultado superior ao CAP 50/70 não modificado, 0,83 MPa e 0,71 MPa, respectivamente, isto é, uma diferença relativa de 14,46%. Os estudos de Cao (2006) também tiveram resultados semelhantes. Ao modificar o ligante com borracha de recauchutagem por via seca percebeu-se um aumento na resistência a tração por compressão diametral.

Figura 23 – Resultado da resistência a tração por compressão diametral da amostra com CAP 50/70 não modificado e CAP 50/70 modificado por via seca.

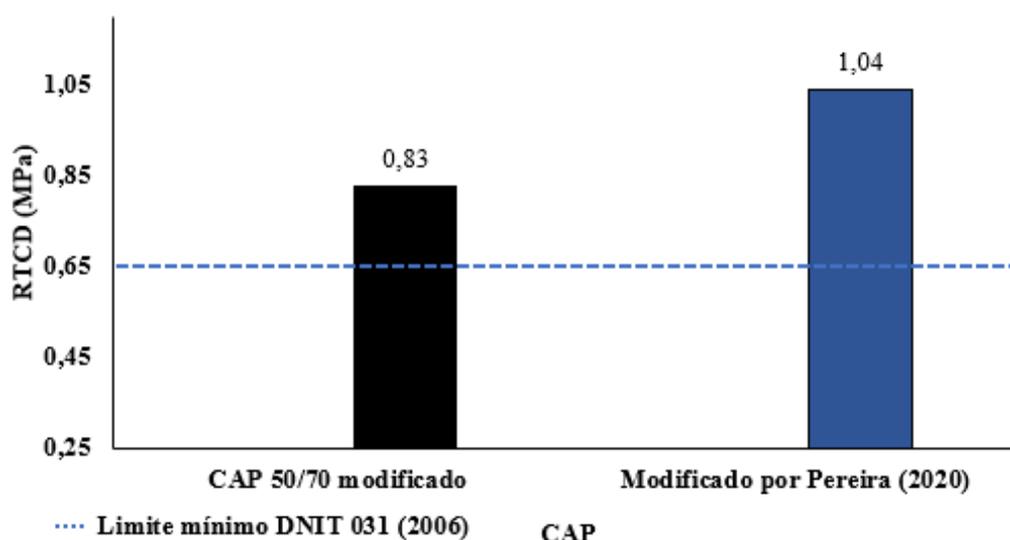


Como critério de comparação, a pesquisa de Santos e Lourenço (2018) analisou a mistura asfáltica a quente com a escória de cobre pós-jateada como agregado miúdo e obteve valores semelhantes da ordem de 1,00 MPa e 1,014 MPa para a mistura com escória de cobre pós-jateada e com agregado pétreo, respectivamente.

Ao comparar o resultado da mistura de CAP 50/70 modificado por via seca, com a mistura de CAP 50/70 modificado por via seca com borra oleosa e borracha de pneu do estudo de Pereira (2020) percebe-se uma diferença em cerca de 25,30%, uma vez que o primeiro tem resistência de 0,83 MPa e o segundo 1,04 MPa. É possível que essa diferença seja devida à distribuição granulométrica das misturas.

Segundo Bardini (2013) o fíler envolve e aglutina os agregados graúdos das misturas asfáltica, além de preencher os vazios do esqueleto mineral. Dessa forma, como a mistura de Pereira (2020) tem uma porcentagem maior de fíler, ou seja, partículas finas, há uma maior facilidade de preencher os vazios no esqueleto mineral. Assim, como ambas as misturas são por via seca, o método de compactação por golpes pode influenciar no aumento a resistência à tração, devido a maior compacidade e facilidade do fíler ocupar os espaços vazios.

Figura 24 – Resultado da resistência à tração por compressão diametral da mistura asfáltica modificada com por via seca e da mistura modificada por via seca com borracha de pneu e borra oleosa.



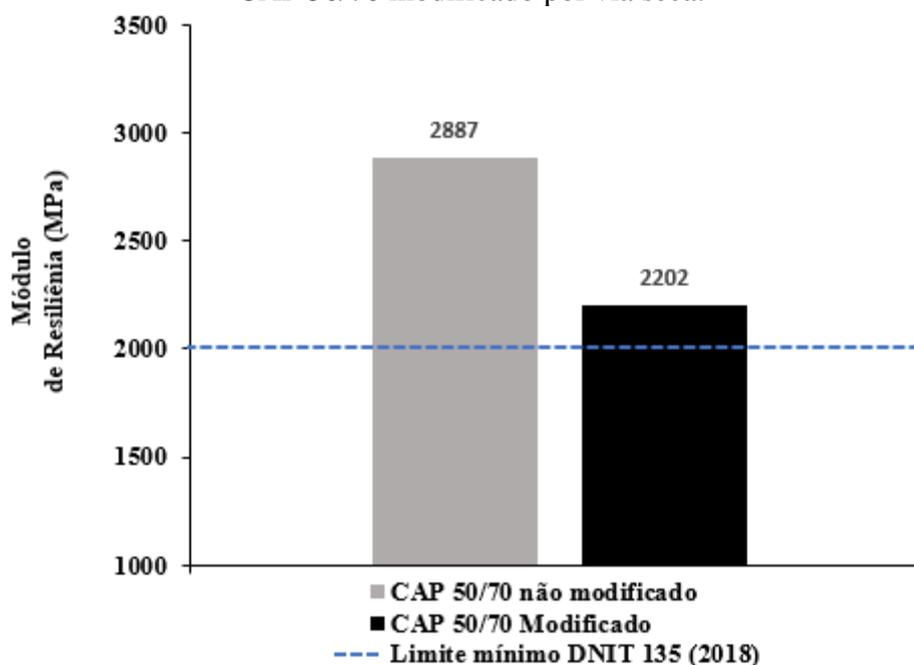
De maneira geral, pode-se concluir que ao modificar o CAP 50/70 e adicionar escória de cobre como agregado miúdo por via seca há um aumento do valor de resistência à compressão diametral em relação ao CAP não modificado. Além disso, a presença de partículas finas presentes na mistura pode proporcionar uma maior rigidez (CHEN E PENG, 1998), aumentando a sua resistência a tração devido a metodologia de compactação (SANTANA, 2015). Porém, para todos os resultados, os valores apresentaram resistência à tração por compressão superior ao limite mínimo exigido pela norma do DNIT 031 (2006), que é 0,65 MPa para misturas asfálticas na faixa “C”.

4.4.3 Módulo de resiliência

Os resultados obtidos das misturas asfálticas ensaiadas com o uso do CAP 50/70 não modificado e modificado pelo processo seco estão apresentados na **Erro! Autoreferência de indicador não válida..** Observa-se que o módulo de resiliência diminuiu com a modificação

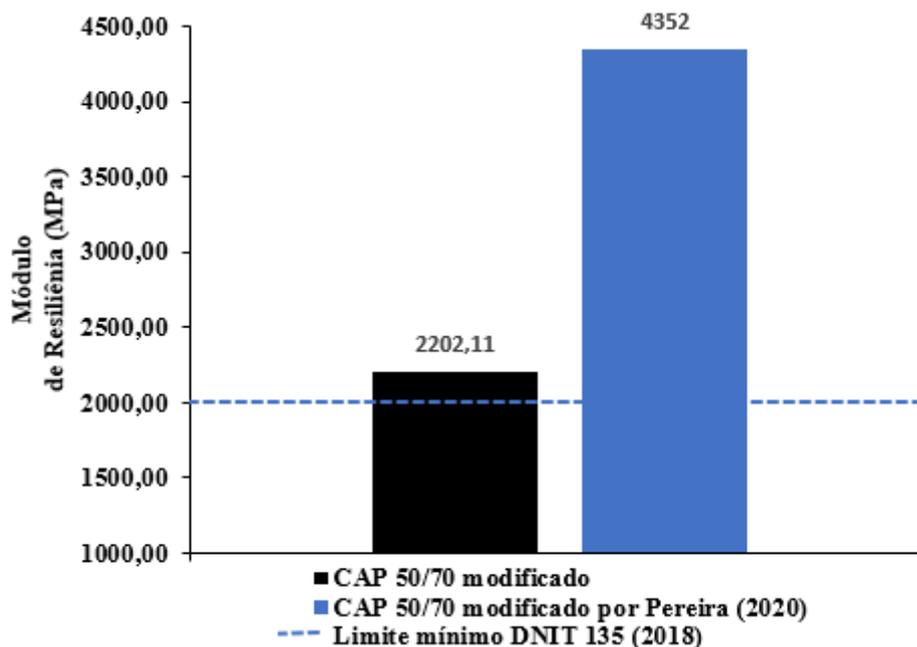
do ligante por via seca. Essa diminuição é equivalente a 23,72%. Esse mesmo fenômeno aconteceu com Salini (2000), ao adicionar borracha houve uma queda significativa em relação à mistura de referência. De acordo com Bernucci *et. al* (2006), os valores do módulo de resistência devem estar entre 2000 e 8000 MPa, e que para valores menores, geralmente, representam misturas modificadas com borrachas. Dessa forma, entende-se que o valor encontrado nesta pesquisa está de acordo com o referencial teórico mencionado.

Figura 25 – Resultado do módulo de resiliência da amostra com CAP 50/70 não modificado e CAP 50/70 modificado por via seca.



Ao comparar o resultado do CAP 50/70 modificado desta pesquisa com o estudo de Pereira (2020) de CAP 50/70 modificado por via seca com borracha de pneu e borra oleosa (Figura 26), percebe-se que o módulo de resiliência obtido pelo processo de via seca e metodologia Marshall foi cerca de 12% maior que o modificado desta pesquisa. Entende-se que a utilização de borracha como modificador tem como variável determinante a temperatura. De acordo com Hernández *et. al* (2009) a borracha de pneu, ao ser introduzida como modificador, pode não se dissolver completamente e se comportar elasticamente dentro da mistura, independente do endurecimento do ligante à medida que a borracha absorve seus componentes mais leves. Exemplo disso, é o estudo de Dias (2005), que ao modificar o ligante com borracha por via seca percebeu que o módulo de resiliência diminuiu quando comparado com a mistura do CAP não modificado. Dessa forma, o *masterbatch* preparado pode ter proporcionado a diferença percentual das pesquisas.

Figura 26 – Resultado do módulo de resiliência da amostra com CAP 50/70 não modificado e CAP 50/70 modificado por via seca.



A quesito de comparação, o estudo de Santos e Lourenço (2018) apresenta valores de 4.013 MPa e 4989,3 MPa, com a escória de cobre pós-jateada e com o agregado pétreo, respectivamente. Quanto menor for o valor do MR, são mais flexíveis são as misturas, uma vez que quando o valor do módulo de resiliência cresce, as misturas se comportam mais rígidas, e portanto, mais frágeis, susceptíveis ao trincamento.

Portanto, pode-se concluir que os valores do módulo de resiliência das misturas asfálticas com ligante modificado por via seca estão dentro do limite recomendado pela norma do DNIT 135 (2018), isto é, acima de 2000 MPa.

4.4.4 Desgaste por abrasão – Cântabro

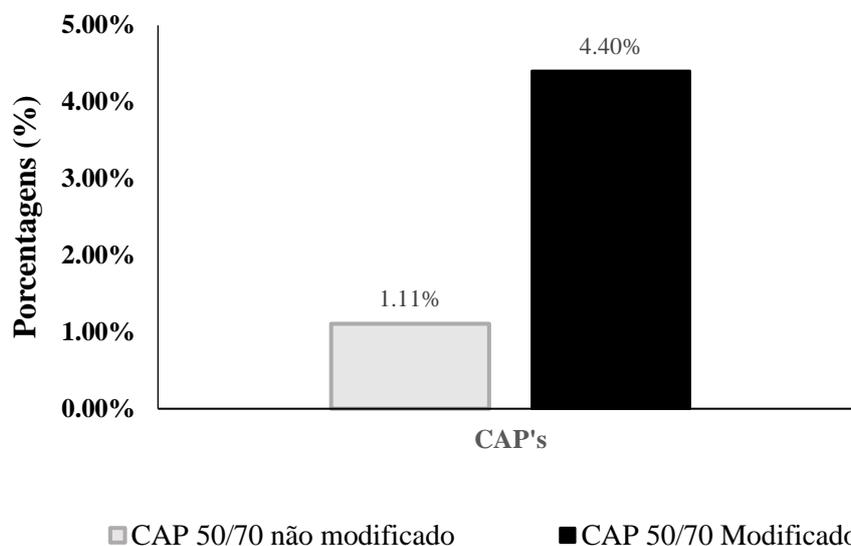
A avaliação da durabilidade do material, ou da perda de adesão/coesão foi realizada pelo ensaio de cântabro. A metodologia consiste em analisar a perda de massa causada pelo desgaste das misturas submetidas ao aparelho de abrasão Los Angeles, sem esferas metálicas. Após a realização do ensaio, percebeu-se que o desgaste concentrou-se nas bordas dos corpos de prova, como ilustra a Figura 27.

Figura 27 – Fotografia dos CP's após o ensaio de cântabro – a) CP's do CAP 50/70 não modificado e b) CP's do CAP 50/70 modificado por via seca.



A Figura 28 mostra corpos de prova das misturas asfálticas com ligante CAP 50/70 não modificado e modificado, por via seca, após o ensaio de desgaste por abrasão. Observa-se que o CAP 50/70 não modificado apresenta uma coesão maior em relação ao modificado, uma vez que a perda de massa foi menor, isto é, 1,11% massa/massa, enquanto que para a mistura asfáltica com o CAP 50/70 modificado a perda de massa foi de 4,4% massa/massa.

Figura 28 – Resultado de desgaste por abrasão – Cântabro de misturas asfálticas com ligante não modificado e modificado por via seca.



Em contrapartida, no trabalho de Santos e Lourenço (2018), por exemplo, a mistura contendo escória de cobre – mistura asfáltica modificado – apresentou valores menores que o da mistura convencional, 1,63% e 2,21% (LOURENÇO, 2015), respectivamente. Resultados análogos foram obtidos por Centofante *et. al* (2018) quando analisou a mistura asfáltica contendo resíduo industrial.

Essa diferença percentual pode ser devido ao método utilizado na dosagem, uma vez que as pesquisas citadas de Lourenço (2015), Centofante *et. al* (2018) e Lourenço (2018) foram dosagens por via úmida. Álvarez *et. al* (2008) afirmou que os resultados do ensaio podem ser mais influenciados pelas propriedades dos agregados das misturas do que das próprias características do ligante.

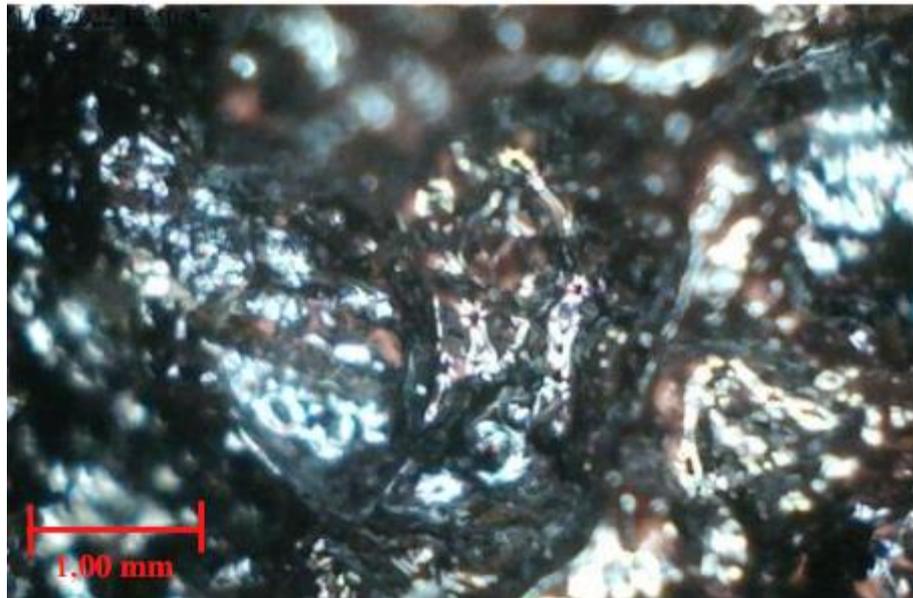
É importante ressaltar que quanto menor a perda de massa do Cântabro, melhor será sua resistência à desagregação. Porém, a porcentagem perdida do CAP 50/70 modificado por via seca apresenta resultado inferior ao máximo admitido para misturas asfálticas – DNER-ES 383 (1999) -, isto é, 25%. Dessa forma, pode-se inferir que, ainda que haja um aumento de perda de massa com a inserção do resíduo industrial, essa perda é inferior ao limite máximo da norma.

4.4.5 Superfícies de ruptura após ensaios mecânicos

Após os ensaios de estabilidade Marshall e resistência à tração por compressão diametral, analisou-se as faces de ruptura com um microscópio óptico com a intenção de verificar a adesão e o cobrimento do ligante nas faces dos agregados.

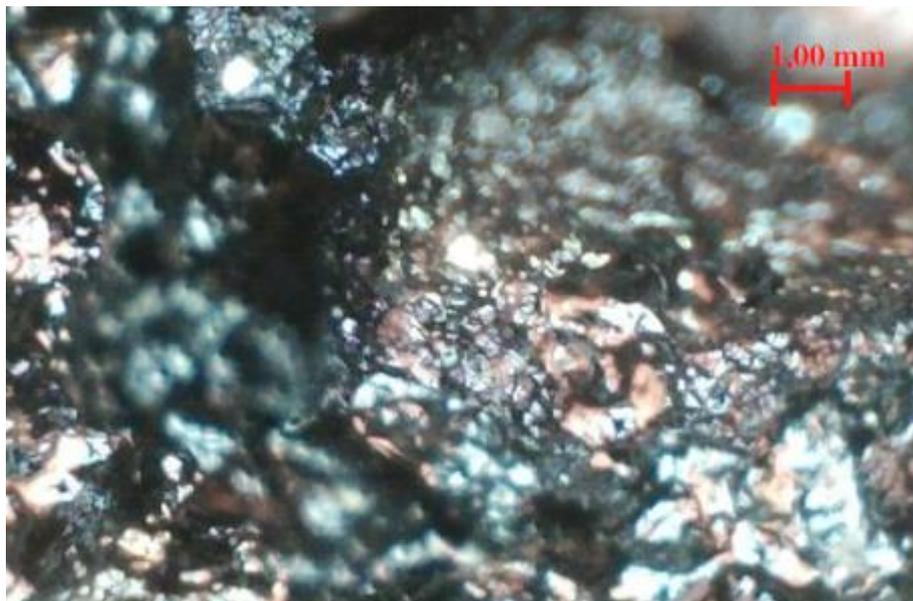
Na Figura 29 e Figura 30 mostram imagens da superfície de ruptura dos ensaios Marshall e resistência à tração por compressão diametral da mistura asfáltica em estudo com o CAP 50/70 não modificado. Percebe-se que há uma camada fina de ligante sobre as superfícies do agregado proporcionando boa ligação entre os materiais o que comprova a eficiência da dosagem de ligante das misturas asfálticas.

Figura 29 – Micrografia por microscópio óptico da face de ruptura do mistura asfáltica com o CAP 50/70 após o ensaio de estabilidade Marshall com aumento de 400x.



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/DEQ/UFS, 2022)

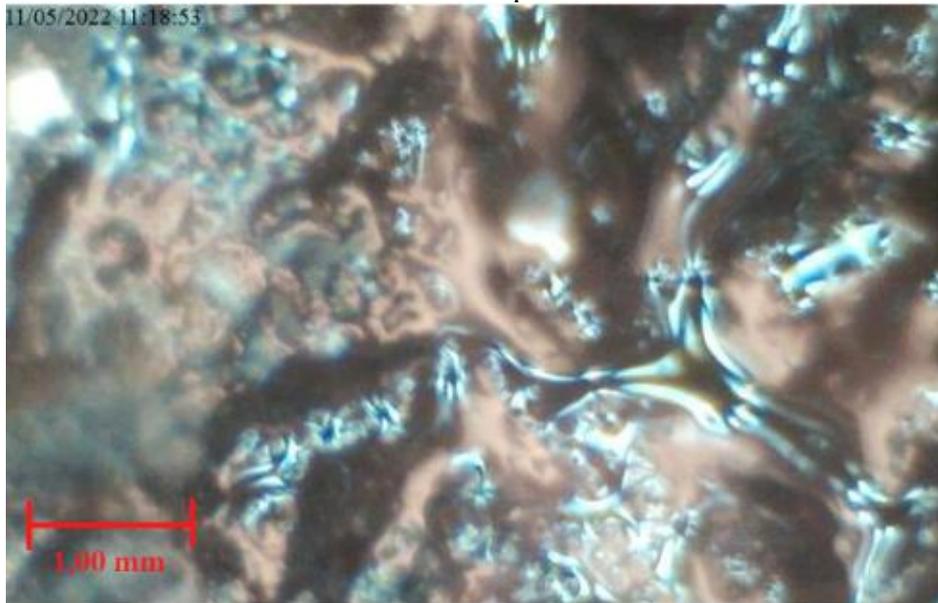
Figura 30 – Micrografia por microscópio óptico da face de ruptura do mistura asfáltica do CAP 50/70 após o ensaio de resistência a compressão diametral com aumento de 200x.



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/DEQ/UFS, 2022)

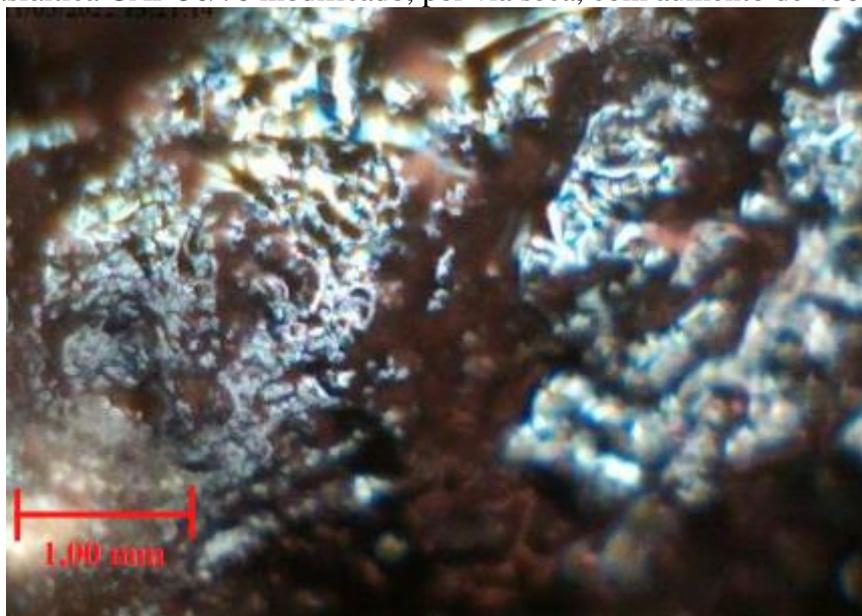
A Figura 31 e Figura 32 mostram as imagens da face de ruptura dos ensaios de Marshall e resistência à tração por compressão diametral do CAP 50/70 modificado por via seca. Pode-se afirmar que mesmo com a modificação do ligante, o mesmo recobriu os agregados para proporcionar uma maior efetividade a mistura, bem como garantir uma acurácia dos valores apresentados nesta pesquisa.

Figura 31 – Micrografia por microscopia óptica após o ensaio estabilidade Marshall para o mistura asfáltica CAP 50/70 modificado por via seca com aumento de 400x.



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/DEQ/UFS, 2022)

Figura 32 – Micrografia por microscópio óptico após o ensaio de RTCD para o mistura asfáltica CAP 50/70 modificado, por via seca, com aumento de 400x.



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat/DEQ/UFS, 2022)

Desta forma, pode-se concluir que tanto para o ligante CAP 50/70 não modificado, quanto o modificado, por via seca, recobriram as superfícies dos agregados nas misturas asfálticas em estudo.

4.4.6 Comparação dos resultados da pesquisa com os obtidos por Pereira (2020)

Diante do que foi discutido entende-se que os resultados mecânicos apresentaram valores satisfatórios de acordo com as suas respectivas normas.

A Tabela 19 apresenta um resumo comparativo dos principais resultados obtidos nesta pesquisa com os obtidos por Pereira (2020) quando estudou o mesmo sistema de modificação de ligante a obtenção de misturas asfálticas, sem a substituição parcial dos agregados pétreos miúdos por escória de cobre pós-jateada.

Tabela 19 – Comparação dos resultados da pesquisa com os obtidos por Pereira (2020)

Ensaio	CAP 50/70 não modificado	CAP 50/70 modificado	CAP 50/70 modificado por Pereira (2020)
RBV (%)	78,50%	78,50%	80,37%
VV (%)	4,16%	3,46%	3,52%
Teor de projeto (%)	6,82%	5,30%	6,10%
Estabilidade Marshall (Kgf)	696,00	698,63	824,07
Resistência a tração por compressão diametral (MPa)	0,71	0,83	1,04
Módulo de Resiliência (MPa)	2887	2202	4352
Cântabro	1,11%	4,40%	-

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Diante dos resultados experimentais apresentados e discutidos nesta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

Os teores de projeto de ligante para o concreto com ligante CAP 50/70 não modificado e modificado apresentaram valores distintos, donde se conclui que o CAP 50/70 modificado apresentou menor teor de projeto de ligante, indicando que o mistura asfáltica de ligante modificado possui menor porosidade, o que pode ser atribuído à presença da escória de cobre pós-jateada.

Quanto ao comportamento da estabilidade Marshall da mistura asfáltica com o CAP 50/70 modificado, quando comparado ao do CAP 50/70 não modificado, observa-se que não houve mudança expressiva. Contudo, com relação à RTCD, a variação foi 14,46%, concordando com a argumentação apresentada para o menor valor do teor de ligante de projeto da mistura asfáltica com o CAP 50/70 modificado ser mais denso (menos poroso).

Os ensaios de módulo de resiliência com a mistura asfáltica com o ligante CAP 50/70 modificado apresentaram valores menores que os do CAP 50/70 não modificado, porém, o desgaste à abrasão ligeiramente maior o que pode ser atribuído à falhas no processamento de compactação dos CP's, quando dos seus processamentos.

A mistura asfáltica de ligante modificado com *masterbatch* de borra oleosa de petróleo e borracha de pneus, por via seca, tendo a escória de cobre pós-jateada como substituição parcial de agregado miúdo (5% massa/massa), atende às normas técnicas e também apresenta possibilidade de atender às atuais condições de uso, como material de revestimento de pavimento rodoviário.

A viabilidade do uso do CAP 50/70 modificado com os resíduos industriais, em estudo, tendo a escória de cobre pós-jateada como substituto parcial do agregado miúdo em mistura de revestimentos asfálticos do tipo CAUQ, apresenta a vantagem de não haver pré-aquecimento do CAP na sua modificação, e de dar destinação segura aos resíduos industriais empregados neste estudo, além de diminuir o uso de recursos naturais não renováveis em obras de infraestrutura rodoviária.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o ensaio de Lottman para ambas as misturas com a finalidade de analisar o comportamento do CAP na presença da umidade.
- Comparar os resultados desta pesquisa, modificação do CAP 50/70 por via seca, com a por via úmida, com a finalidade de realizar uma melhor análise dos dois processos de modificação de ligante asfáltico;
- Investigar a resistência quanto à deformação permanente por meio do ensaio uniaxial de carga repetida para avaliar a resistência da mistura asfáltica em condições de uso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCOBRE- Associação Brasileira do Cobre. **Procobre: O cobre**. São Paulo. Disponível em: <<http://abcobre.org.br/o-cobre/>>. Acesso em: 26 de maio, 2021.

ABEDA. Associação Brasileira de Empresas Distribuidoras de Asfaltos. **Produtos**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.abeda.org.br/produtos/>>. Acesso em: 26 de maio, 2021.

ABNT. NBR 10004/2004 - **Resíduos sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. NBR 10005/2004 – **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. NBR 10006/2004 – **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. NBR 12584/2017 – **Agregado miúdo – Verificação da adesividade ao ligante betuminoso**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ABNT. NBR 12653/2015 – **Materiais Pozolânicos – Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ABNT. NBR 15184/2021 – **Materiais Betuminosos – Determinação da Viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

ABNT. NBR 7809/2019 – **Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABNT. NBR 9935/2011 – **Agregados – Terminologia**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

ADHIKARI, B.; MAITI, D. DE. S. Reclamation and recycling of waste rubber. **Progress in Polymer Science**. V, 25, n. 7, p. 909-948, set, 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (BRASIL). Ministério de Minas e Energia. **Sumário Mineral 2017**. Brasília, 2019. 211p.

ALFAYEZ, S.A; SULEIMAN, A.R; NEHDI, M.L. Recycling Tire Rubber in Asphalt Pavements: State of the Art. **Sustainability**, p. 1 -15, out, 2020.

AL-JABRI, K. S.; AL-SAYDY, A. H.; TAHA, R. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 933-938, fev, 2011.

ALMEIDA. G. B. O. **Incorporação de escória de cobre pós-jateada a um solo arenoso de Sergipe para aplicação em base de pavimentos**. 2016, 193 p. Tese (Doutorado

em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ALTER, H. The composition and environmental hazard of copper slags in the context of the Basel Convention. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 43, n. 4, p. 353-360, 2005.

ANDRADE, M. R. A; BRITO, A. L. F; MUNIZ, A. C. S. Tratamento da borra oleosa de petróleo e estudo cinético do processo de estabilização por solidificação. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. Rio de Janeiro. V. 56, n. 31. 66-75, mar, 2014.

ANIP. Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. **Dados Gerais**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://www.anip.org.br/anip-em-numeros/dados-gerais/>>. Acesso em: 05 de julho, 2021.

ANITELLI, A. **Estudo do dano por umidade de misturas asfálticas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado por polímero SBS**. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2013.

ANJOS, M.A.G. **Aplicação da Granalha Batida de Cobre como Substituta Parcial do Agregado Miúdo em Concreto de Cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), p. 83. Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2015.

ASTM T 283 – **Standart method of test for resistance of compacted ashalt mixtures to moisture-induced damage**. Philadelphia, 2014.

BAKHEIT, I.; XAIOMING, H. Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design. **Construction and Building Materials**. V, 220, n. 0, p. 278-284, set, 2019.

BALAGUER, M. **Avaliação estrutural de um pavimento flexível executado em asfalto-borracha, elaborado pelo processo de produção contínua em usina**. 2012. 207p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

BARDINI, V. S. S. **Influência do filer mineral em propriedades de misturas asfálticas densas**. 2013. 344 p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

BARDINI, V. S. S. KLINSKY, L. M. G.; FERNANDES JUNIOR, J. L. F.; ROQUE, R. Correlação da energia de fratura com parâmetros reológicos de ligantes e mástiques asfálticos. **Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**. V. 26, n. 1, p. 1-15, abr, 2018.

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

BERTOLLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. 2002. 252p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

BILLITER, T. C.; DAVISON, R. R.; GLOVER, C.J.; BULLIN, J. A. Physical properties of asphalt-rubber binder. **Petroleum Science and Technology**. V. 15, n. 3, p. 205-236, abr, 2007.

CAO, W. Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. **Science Direct**. V. 21, n. 4, p. 1011-1015, mai, 2007.

CERATI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. Rio de Janeiro, ABEDA, 2015, 166p.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Transporte Rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT, 2017; Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>>. Acesso em: 10 de jun, 2021.

COLLINS, R. J.; CIESIELSKI, S. K. **Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction**. Transportation Research Board, 1994, 92p.

CONG, P.; TIAN, Y.; LIU, N.; XU, P. Investigation of epoxy-resin-modified asphalt binder. **Journal of Applied Polymer Science**. V. 133, n. 21, jun, 2016.

COSTA, M. R. M.; FERREIRA, C. A. M. Uso de Escória de Cobre no Tratamento Anticorrosivo de Superfícies. **INTERCORR**, Salvador, 2012.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástiques e matriz de agregados finos**. 2016, 280 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DA GRAÇA, D. C. S.; CARDOSO, G; CAVALCANTE, E. H. - Dosagem de mistura asfáltica com CAP 50/70 modificado com borra de petróleo. **Scientia Plena**. V. 12, n. 5, p. 127-130, mai, 2016.

DA GRAÇA, D.C.S; CARDOSO, G.; MOTHÉ, C.G. Thermal behavior of asphalt binder with modifying agents from industrial residues. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. V. 138, n. 1, p. 3619-3633, mai, 2019.

DA GRAÇA. D. C. S.; CAVALCANTE, E. H.; CARDOSO, G. Comportamento mecânico de misturas asfálticas de ligante modificado com borra oleosa de petróleo. **Revista Educação Agrícola Superior**. V. 29, n. 2, p. 125-128, 2014.

DALHAT, M. A.; WAHHAB, H. I. A. Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. **International Journal of Pavement Engineering**. V. 18, n. 4, set, 2015.

DHIR, R. K.; BRITO, J.; MANGABHAI R.; LYE C. Q. Sustainable Construction Materials: Cooper Slag. **Use of Cooper Slag in Road Pavement Applications**. Woodhead Publishing. 2017, p. 322.

DNER-ME 035/98 - **Agregados – determinação da Abrasão “Los Angeles”**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.

DNER-ME 038/98 – **Agregados – Análise Granulométrica**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.

DNER-ME 043/95 – **Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1995.

DNER-ME 078/1998 – **Agregado graúdo – adesividade ao ligante betuminoso** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.

DNER-ME 083/1998 – **Agregados – Análise granulométrica** - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.

DNER-ME 194/98 – **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998.

DNER-ME 195/97 - Agregados - **determinação da absorção e massa específica de agregado graúdo**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.

DNER-ME 199/1996 – **Redução de amostras de campo de agregados para ensaio de laboratório**. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1996.

DNER-PRO 120/1997 – **Coleta de amostras de agregados**. Departamento Nacional de estradas de Rodagem, 1997.

DNER-PRO 383/1999 – **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro**. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1999.

DNIT-ME 031/2006 – **Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico Especificação de Serviço**. Departamento Nacional de Infra-estruturas de Transporte, 2006.

DNIT-ME 135/2018 – **Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, 2018.

DNIT-ME 136/2018 – **Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, 2018.

DNIT-ME 411/2021 – **Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de Ensaio**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de transportes, 2021.

DNIT-ME 425/2020 – **Pavimentação – Agregado – Determinação do Índice de Forma com Paquímetro – Método de Ensaio**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, 2020.

DNIT-ME 428/2022 – **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte, 2022.

DOS SANTOS, N. S. **Propriedades reológicas do ligante asfáltico (CAP 50/70) modificado por adição de lignina**. 2017. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

EGAZAR'YANTS, S.V.; VINOKUROV, V.A.; VUTOLKINA, A.V.; TALANOVA, M.Y.; FROLOV, V.I.; KARAKHANOV, E.A. **Oil sludge treatment processes**. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, v. 51, n. 5, p. 506-515, out, 2015.

FABRO, F.; GAVA, G. P.; GRIGOLI, H. B.; MENEGHETTI, L. C. Influence of fine aggregates particle shape in the concrete properties. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. V. 4, n. 2, p. 191-212. Jun, 2011.

FARIAS, R. S., ROCHA, E. O., FREITAS, G. B., SANTOS, D. C., CARDOSO, G. Uso de borra oleosa e borracha de pneus inservíveis na modificação de ligante asfáltico de petróleo CAP 50/70. IN: 11º Congresso Brasileiro de Polímeros, Anais. Campos do Jordão, São Paulo, 2011.

FERNANDES, P. R. N.; ALENCAR, A. E. V.; SOARES, J. B.; CAVALCANTE, R. M.; NASCIMENTO, R. F.; SOARES, S. A.; CASAGRANDE, M. D. T. Estudo comparativo das propriedades químicas do resíduo borra oleosa asfáltica e do ligante asfáltico de petróleo. **Holos**. V. 4, n.0, p. 45-58, set, 2013.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 2009, 581p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Vias de Comunicação) – Escola de Engenharia – Universidade do Minho, Braga, 2009.

FRANCISCO, A. O. S. **Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. 2012, 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Escola Superior e de Gestão – Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2012.

FREIRE, R. A.; BRANCO, V. T. F. C.; VASCONCELOS, K. L. Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com diferentes tamanhos máximos nominais. **Transportes**. V. 22, n. 3, p. 117-127, 2014.

GAUTAM, P. K.; KALLA, P.; JETHOO, A. S.; AGRAWAL, R.; SINGH, H. Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. **Construction and Building Materials**. V. 180, n. 0, p. 239-253, agos, 2018.

GHUZLAN, K. A.; AL ASSI, M. O. Sasobit-Modified Asphalt Binder Rheology. **Journal of Materials in Civil Engineering**. V. 29, n. 9, set, 2017.

GOH, S. W.; AKIN M.; YOU Z.; SHI, X. Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture. **Construction and Building Materials**. V. 25, n. 1, p. 195-200, jan, 2011.

GORAI, B.; JANA, R. K. Characteristics and utilisation of copper slag—a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 39, n. 4, p. 297-392, nov, 2003.

GUIMARÃES, A. K. V.; CHIAVONE-FILHO, O.; do NASCIMENTO, C. A. O.; TEIXEIRA, A. C. S. C.; MELO, H. N. de S. Study of soil characteristics and oil extraction process. **Scielo Brasil**. V. 21, n. 2, jun, 2016.

HAININ, M. R.; YUSOFF, N. I. M.; SABRI, M. F. M.; AZIZ, M. A. A.; HAMEED, M. A. S.; RESHI, W. F. Steel Slag as na aggregate Replacement in Malaysian Hot Mix Asphalt. **International Scholarly Research Network**. V. 2012, p. 1-6, 2012.

HEITZMAN, M. Design and Construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. **Transportation Research Record: Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavements**. n. 1339, 1992.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; WITOSZEK-SHULTZ, M.; ALONSO-FERNÁNDEZ, M.; BENEDITO-MORO, C. Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process. **International Journal of Pavement Engineering**. V. 10, n. 47, p. 277-288, jul, 2009.

HUANG, Y.; BIRD, R. N.; HEIDRICH, O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. **Resources, Conservation and Recycling**. V. 2, n. 1, p. 58-73, nov, 2007.

ICSG. **Cooper Market Forecast 2021/2022**. Lisboa, 2021. Disponível em: <<https://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/113/3098>>. Acesso em: 06 de julho de 2021.

JIN, Y.; ZHENG, X.; CHI, Y.; NI, M. Experimental study and assessment of different measurement methods of water in oil sludge. **Drying Technology**, v. 32, n. 3, p. 251-257, Jan, 2014.

KHANZADI, M.; BEHNOOD, A. Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate. **Construction and building materials**. V. 23, n. 6, p. 2183-2188, jun, 2009.

KIYAK, B. Cr (VI) reduction in aqueous solutions by using copper smelter slag. **Waste Management**, v. 19, n. 5, p. 333-338, 1999.

KOCAK, S.; KUTAY, M. E. Fatigue performance assessment of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using modified asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage analysis and AASHTOWare pavement ME design. **Construction and Building Materials**. V. 248, jul, 2020.

KUMAR, B. Properties of pavement quality concrete and dry lean concrete with copper slag as fine aggregate. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 14, n. 8, p. 746-751, set, 2012.

LEITE, L. M. **Estudo do Preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LEWANDOWSKI, L. H. Polymer modification of paving asphalt binders. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 67, n. 3, p. 447-480, jul, 1994.

LI, M.; WU, G.; FINI, E. H.; YU, M.; XU, Z. Investigation the healing capacity of asphalt mixtures containing iron slag. **Construction and Building Materials**. V. 261, 2020.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R. S. **Melhoradores de adesividade para misturas asfálticas**. Estado da arte, 18º Encontro de asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

LORI, A., BAYAT, A.; AZIMI, A. **Influence of the replacement of fine copper slag aggregate on physical properties and abrasion resistance of pervious concrete**. Road Materials and Pavement Design, V. 22, n. 4, p. 835-851, 2021.

MACHADO, L. F. M.; CARDOSO, G. Estudo do uso de borra oleosa na modificação de ligante asfáltico de petróleo para fins de pavimentação. **InterFaces Científicas – Exatas e Tecnológicas**. V. 2, n. 2, p. 9-18, out, 2016.

MARTINEZ, J. G. B. **Asfaltos e misturas modificadas com materiais alternativos**. 2017, 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

MASTRAL, A. M.; MURILLO, R.; CALLÉN, M. S.; GARCIA, T.; SNAPE, C. E. Influence of Process Variables on Oils from Tire Pyrolysis and Hydrolysis in a Swept Fixed Bed Reactor. **Energy & Fuels and American Chemical Society Journal**. V. 14, n. 4, p. 739-744, Jun, 2000.

MENDES, L. O.; MARQUES, G. L. O. Avaliação da influência do Método Bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas. **Transporte**. V. 20, n. 4, p. 35–43, 2012.

MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n. 1, p. 167–184, jun. 2008.

NASREKANI, A. A.; NADERI K.; NAKHAEI M.; MAHMOODINIA N. High-temperature performance of gilsonite-modified asphalt binder and asphalt concrete. **Petroleum Science and Technology**. V. 34, n. 21, p. 1783-1789, dez, 2016.

NGUYEN, E. T. T.; TRAN, T. N. Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of asphalt concrete and stone mastic asphalt using dry process. **Pavement Research and Technology**. V. 11, n. 3, p. 236-244, maio, 2018.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2000. 280 p. Tese (Doutorado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

OLIVEIRA, N; GUALBERTO FILHO, A; RAMALHO NETA, D; COSTA, D; LIMA, G; BATISTA, L. Análise Comparativa das Propriedades Reológicas de Ligantes Asfálticos Modificados por Adição De Politereftalato de Etileno Micronizado e de Borracha De Pneu Triturada. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020.

OMM-E-HANY; SHAH, D.; HASAN, S.A.; ALAMGIR, A. Biodegradation of crude petroleum oil by indigenous and isolated bacterial strains. **American-Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Science**, v. 15, n. 9, p. 1827-1834, set, 2015.

ONOFRE, F. C.; BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, J. B.; FAXINA, A. L. Avaliação do efeito de ligantes asfálticos modificados na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas. **Transportes**. V. 21, n. 3, p. 14-21, dez, 2013.

PARANAPANEMA. **Relatório de Sustentabilidade 2016**. Bahia, 2017, 50p.

PEREIRA, M. H. N. **Análise comparativa do comportamento mecânico de concreto asfáltico usando ligante modificado por via seca e por via úmida com mistura de resíduo industrial: borracha de recauchutagem de pneu e borra oleosa de petróleo**. 2020. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2020.

PETROBRAS. **Produção Média de Petróleo no Pré-sal**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 06 de julho de 2021.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de borracha de pneu sem misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos úmido e seco)**. 2004, 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2004.

PREM, P. R.; VERMA, M.; AMBILY, P. S. Sustainable cleaner production of concrete with high volume copper slag. **Journal of Cleaner Production**. V. 193, p. 43-58, abr, 2018.

PRESTI, D. L. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 863-881, dez, 2013.

RAMARAD, S.; KHALID, M.; RANATNAM, C. T.; LUQMAN CHUAH, A.; RASHMI, W. Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. **Progress in Materials Science**. V, 72, n. 0, p. 100-140, 2015.

RAPOSEIRAS, A. C.; MOVILLA-QUESADA, D.; MUÑOZ-CÁCERES, O.; ANDRÉS-VALERI, V. C.; LAGOS-VARAS, M. Production of asphalt mixes with copper industry wastes: Use of copper slag as raw material replacement. **Journal of Environmental Management**. V. 293, set, 2021.

RAPOSEIRAS, A., M. D., VARGAS, A., BILBAO, R.; CIFUENTES, C. Evaluation of Marshall stiffness, indirect tensile stress and resilient modulus in asphalt mixes with reclaimed asphalt pavement and copper slag. **Revista Ingeniería de Construcción**. V. 32, n. 1, p. 15-24, abr, 2017.

RATH, P.; LOVE, J. E.; BUTTLAR, W. G.; REIS, H. Performance analysis of asphalt mixtures modified with ground tire rubber modifiers and recycled materials. **Sustainability**. V. 11, n. 6, mar, 2019.

RECICLANIP. O ciclo sustentável do pneu. **Destinados**. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://www.reciclanip.org.br/destinados/>>. Acesso em: 06 de julho de 2021.

RODGERS, M. B.; ABDULLAHI, A. A. Rubber Tires. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**. 2016.

RODRÍGUES-FERNÁNDEZ, I. R.; BAHERI, F. T. CAVALLI, M. C. POULIKAKOS, L. D.; BUENO, M. Microstructure analysis and mechanical performance of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process. **Construction and Building Materials**. V. 259, n. 3, out, 2020.

RODRIGUEZ-FERNÁNDEZ, I; CAVALLI, M. C.; POULIKAKOS, L.; BUENO, M. Recyclability of asphalt mixtures with crumb rubber incorporated by dry process: a laboratory investigation. **Materials**. V. 13, n. 2870, p. 1-13, 2020.

SALINI, R. B. **Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas**. 2000. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SANCHEZ, SUDBURY, M. Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly enviromental management. **Journal of Mining and Metallurgy**. V, 49, n. 2, p. 161-168, mar, 2013.

SANTANA, R. R.; DOS SANTOS, R.; CAVALCANTE, E. H.; CARDOSO, G. Estabilidade e adesividade de ligante asfáltico modificado com blenda de borra oleosa de petróleo com borracha de pneu. **Revista Matéria**. V. 23, n. 1, jan, 2018.

SANTOS, G. P. P. **Um estudo sobre a utilização da escória de ferromnício em pavimento rodoviário**. 2013. 125p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar em Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

SANTOS, T; LOURENÇO, V. **Análise De Técnica De Mistura Asfáltica Tipo Concreto Asfáltico Usinado A Quente Com Utilização De Escória Como Agregado Miúdo**. ANPET, Gramado, 2018.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2 ed. V. 2. São Paulo: Pini, 1997, 779 p.

SHARMA, D. K. SWAMI, B. L. VYAS, A. K. Performance evaluation of hot mix asphalt containing copper slag. **Materials today: Proceeding**. V. 38, n. 3, p. 1241-1244, ago, 2020.

SHELL. **The Shell bitumen handbook**. 5. ed. London: Shell Bitumen/Thomas Telford Publishing, 2003, 464p.

SIMIONATO, L. R.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. O efeito da alteração do ligante asfáltico no desempenho de pavimentos flexíveis. **Revista de Engenharia Civil**. V. 54, p. 26-35, mar, 2018.

SINGH; A. K.; SAHOO, J. P. Rutting prediction models for flexible pavement structures: A review of historical and recent developments. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. V. 8, n. 3, p. 315-338, jun, 2021.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 280 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SUN, Z.; YI, J.; HUANG Y.; FENG, D.; GUO, C. Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. **Construction and Building Materials**. V. 102, n. 1, p. 496-504, jan, 2016.

TORRÃO, H. C. **Reabilitação de Pavimentos Flexíveis**. 2015. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Escola Superior de tecnologia e Gestão – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2015.

VASCONCELOS, K. L.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N.; SOARES, J. B. Medidas de adesão entre agregado e ligante asfáltico. **Transportes**. V. 16, n. 1, p. 17-24, jun, 2008.

WANG, G. C. Slag use in asphalt paving. **The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction**. V. 1, n. 10, p. 201-238, 2016.

WESSELING, D. H. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais**. 2005, 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

WU, W., ZANG, W., MA, G. Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete. **Materials & Design**. V. 31, n. 6, p. 2878-2883, 2010.

XIE, J.; YANG, Y.; Lv, S.; ZHANG, Y.; Zhu, X.; ZHENG, C. Investigation on Rheological Properties and Storage Stability of Modified Asphalt Based on the Grafting Activation of Crumb Rubber. **Polymers**. V. 11, p. 1563, 2019.

ZAIN, M. F. M.; ISLAM, M. N.; RADIN, S. S.; YAP, S. G. Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag. **Cement & Concrete Composites**. V. 26, n. 7, p. 845-851, out, 2004.

ZEGARRA, J. R. E. **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76-22**. 2007, 264 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ZHANG, H. **Introductory Chapter: Asphalt and Asphalt Mixture**. Asphalt and Asphalt Mixture. United Kingdom, London, British Library, 2019, 135p.

ZIARI, H.; MONIRI, A.; IMANINASAB, R.; NAKHAEI, M. Effect of copper slag on performance of warm mix asphalt. **International Journal of Pavement Engineering**. V. 20, n. 7, p. 775-781, Jun, 2017.