



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

FLÁVIA DO SOCORRO DE SOUSA CARVALHO

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE
CASCALHO DE POÇOS DE PERFURAÇÃO**

CAMPINA GRANDE - PB

2021

FLÁVIA DO SOCORRO DE SOUSA CARVALHO

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE
CASCALHO DE POÇOS DE PERFURAÇÃO**

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

Área de concentração: Geotécnica

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

CAMPINA GRANDE-PB

2021

C331e Carvalho, Flávia do Socorro de Sousa.
Estudo de misturas asfálticas com adição de cascalho de poços de perfuração / Flávia do Socorro de Sousa Carvalho. – Campina Grande, 2021.
124 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.
“Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena”.
Referências.

1. Misturas Asfálticas. 2. Mástique Asfáltico. 3. Reologia de Ligantes. 4. Cascalho de Perfuração. 5. Resistência Mecânica. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 625.85(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Flávia do Socorro de Sousa Carvalho

Título: ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE CASCALHO DE POÇOS DE PERFURAÇÃO

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

Área de concentração: Geotecnia

Dissertação defendida e aprovada em: 30/08/2021 Pela banca

examinadora:



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

de Campina Grande – PB



Avaliador interno: Prof. Dsc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande – PB



Avaliador externo: Prof. Dsc. Ricardo Almeida de Melo

Universidade Federal da Paraíba – PB

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à Deus, à minha família e meus amigos que sempre estiveram presentes.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, por ser meu guia e não me deixar desistir dos meus objetivos por mais difícil que tenha sido toda a minha trajetória.

A minha mãe, Glemilde, que diante de tantas adversidades foi meu alicerce e não mediu esforços para que eu pudesse enfrentar essa caminhada e que sempre me disse que o melhor presente que poderia me ofertar seria um anel de formatura. Agora, o anel se torna um diploma de mestre. Ao meu pai, Pedro, que nunca pode estudar devido as dificuldades financeiras, mas que sempre nos ensinou que o melhor caminho sempre é o da educação. As minhas conquistas, são suas conquistas e são dedicadas a vocês.

Agradeço aos meus irmãos Gláucia e Valentim, pela amizade e companheirismo. E aos meus familiares, que sempre apoiaram e incentivaram esta jornada. Em especial as minhas queridas tias: Nenzinha, Da Paz, Ana, Raimunda e Santa. Vocês são muito especiais.

A minha madrinha, Laidnns, a quem eu chamo carinhosamente de “Inha”. Que sempre foi uma inspiração para mim e para meus objetivos de vida. Como também aos seus pais João Pequeno (in memorian) e Anaíde, seus irmãos Samara e Emanuel vocês estarão sempre no meu coração. E não poderia deixar de fora as minhas amadas, Livia e Laura. Flavinha ama vocês!

Agradeço a todos os meus educadores desde a minha escola Padre Cícero localizada no interior do Piauí, aos professores do colégio São Lucas e aos mestres da UFCG, especialmente aos professores do curso de Engenharia Civil. Aos meus professores do PPGECA.

Aos meus amigos, Osires e Daniel que foram chave fundamental nesse processo de aprendizagem. Eu não teria palavras para expressar os meus agradecimentos por cada momento que eu pude contar com vocês, a palavra obrigado não tem como expressar o quanto vocês foram importantes e essenciais para produção desse trabalho.

Aos meus amigos que conquistei ao longo da vida, em especial a Lúcia Marina, Andreina, Vanessa Bezerra, Maria Clara, Virgínia Almeida, Anna Cristina, Bárbara, Beatriz, Déborah L., Tatiana Teixeira, Lucas Rafael, Pedro Matheus, Camila Farias, Amanda Almeida, Anna Karolina e Vânia Bezerra. Obrigada por me apoiarem e tornarem essa caminhada menos cansativa.

Aos colegas e técnicos do LEP, Thalita Porto, Tássila Porto, Samir, Alexandre, Thamires, Priscila, Jadilson, Nildinho, Ladjane e Arthur. Agradeço especialmente a Vinícius por ter me ajudado tanto na execução dos ensaios.

Ao meu orientador, Adriano Elísio, obrigada por acreditar em meu potencial e conceder a oportunidade e as ferramentas para meu crescimento profissional, muito obrigada.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), pela oportunidade de contribuir para meu desenvolvimento acadêmico.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), por fornecer os meios para a realização da minha pesquisa.

Ao CNPq por disponibilizar a bolsa, assim possibilitando o prosseguimento da minha vida acadêmica.

MUITO OBRIGADA!!!

EPÍGRAFE

“Nada é tão nosso quanto os nossos sonhos.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

Um dos subprodutos da indústria petrolífera que é disposto na natureza na forma de resíduos são os cascalhos de perfuração de petróleo (resíduo oleoso (RO) oriundo das atividades de exploração e produção de petróleo). Estes são fragmentos de rocha deslocados pela broca e carregados pelo fluido de perfuração no ato de perfuração de poços de petróleo. Quando dispostos inadequadamente no meio ambiente, os resíduos gerados durante as operações de perfuração de poços de petróleo, poluem o solo, deterioram a paisagem urbana e constituem um passivo ambiental, caso sejam destinados a aterros sem tratamento prévio. Como forma de reutilizar o RO, nesta pesquisa foi proposta a sua utilização como filler nas misturas asfálticas. Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com adição de cascalho proveniente de poços de perfuração, visando a sua aplicação em revestimentos asfálticos de estradas. Como forma de atingir o objetivo da pesquisa foi desenvolvido um programa experimental dividido em duas etapas: análise mecânica e análise reológica. Para realização da análise mecânica foi utilizada a metodologia SUPERPAVE para dosagem das misturas asfálticas, sendo o teor de 2 % de cal determinado por meio desta e substituído totalmente (uso de 2% de RO) e parcialmente (uso de 1% de RO + 1% de cal), sendo assim possível executar as análises mecânicas por meio dos ensaios de Resistência a Tração (RT), ensaio de Lottman, Módulo de Resiliência (MR), Flow Number (FN) e Módulo Dinâmico (MD). Para análise reológica foi formado o mástico asfáltico em três teores 2% de RO, 1% de RO + 1% de cal, 2% de cal, em comparação ao CAP 50/70 puro. Os resultados mecânicos indicam que é possível a utilização do RO como filler nas misturas asfálticas, uma vez que o seu uso não compromete a resistência mecânica das mesmas. Os resultados reológicos indicam que a incorporação do RO no cimento asfáltico de petróleo, aumenta a viscosidade e o módulo complexo, porém, reduz a resistência ao dano. Portanto, o comportamento do mástico asfáltico a partir da incorporação do RO, apresenta uma menor susceptibilidade a variação térmica, e consequentemente, um aumento na resistência à deformação permanente, entretanto, apresenta uma menor vida de fadiga.

Palavras-chave: Mástico asfáltico, Reologia de ligantes, Cascalho de perfuração, Resistência mecânica.

ABSTRACT

One of the by-products of the oil industry that is disposed of in nature in the form of waste is oil drilling cuttings (oily waste (OR) from oil exploration and production activities). These are rock fragments displaced by the drill and carried by the drilling fluid in the act of drilling an oil well. When improperly disposed of in the environment, the waste generated during oil well drilling operations pollutes the soil, deteriorates the urban landscape, and constitutes an environmental liability if sent to landfills without prior treatment. As a way to reuse RO, in this research, it was proposed its use as a filler in asphalt mixtures. This work aimed to evaluate the mechanical behavior of asphalt mixtures with the addition of gravel from drilling wells, aiming at its application in asphalt road coatings. To achieve the research objective, an experimental program was developed in two stages: mechanical analysis and rheological analysis. To perform the mechanical analysis, the SUPERPAVE methodology was used for dosing the asphalt mixtures, with the content of 2% of lime determined through this and replaced totally (use of 2% of RO) and partially (use of 1% of RO + 1 % of lime), thus being possible to perform the mechanical analysis through the Tensile Strength (RT), Lottman test, Resilience Module (MR), Flow Number (FN) and Dynamic Module (MD) tests. For rheological analysis, the asphalt mastic was formed in three contents 2% RO, 1% RO + 1% lime, 2% lime, compared to pure CAP 50/70. The mechanical results indicate that it is possible to use RO as a filler in asphalt mixtures since its use does not compromise their mechanical strength. The rheological results indicate that the incorporation of RO in the binder increases the viscosity and the complex modulus, however, it reduces the damage resistance. Therefore, the behavior of the asphalt mastic from the incorporation of RO presents a lower susceptibility to thermal variation, and consequently, an increase in the resistance to permanent deformation, however, it presents a shorter fatigue life.

Keywords: Asphalt putty, Binding rheology, Drilling gravel, Mechanical strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração das camadas do pavimento	23
Figura 2 - Deposição de resíduos de gesso	27
Figura 3 - Cinza volante	29
Figura 4 - Resíduo de Polimento de Porcelanato.....	30
Figura 5 - Esquema de perfuração de poço.....	31
Figura 6 - Execução da técnica de Roadspreding	36
Figura 7 - Unidade de dessorção térmica convencional.....	41
Figura 8 - CAP 50/70	44
Figura 9 - Agregados graúdos usados na pesquisa	45
Figura 10 - Agregados miúdos usados na pesquisa	45
Figura 11 - Filer	46
Figura 12 - Cascalho de perfuração de petróleo	46
Figura 13 - Fluxograma de caracterização física da pesquisa	47
Figura 14 - Sequência de Atividades da pesquisa	48
Figura 15 - Curva granulométrica dos agregados	53
Figura 16 - Gráfico da distribuição granulométrica do resíduo oleoso obtida por difração à laser	57
Figura 17 - Análise Térmica Diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) do resíduo oleoso de petróleo.....	59
Figura 18 - Difratograma do cascalho	60
Figura 19 - Fluxograma da dosagem SUPERPAVE	61
Figura 20 - Curva granulométrica inferior	62
Figura 21 - Curva granulométrica intermediária	62
Figura 22 - Curva granulométrica superior.....	63
Figura 23 - Compactador SUPERPAVE.....	63
Figura 24 - Agitador mecânico	68
Figura 25 - Viscosímetro Brookfield	69
Figura 26 - Reômetro de cisalhamento direto (DSR)	70
Figura 27 - CP's submetidos a pressão de vácuo	74
Figura 28 - Subdivisões da curva oriunda do ensaio de Flow Number	75
Figura 29 - Corpos de prova do ensaio de Flow Number	76

Figura 30 - Corpos de prova do ensaio de MD	78
Figura 31 - Perda de massa.....	79
Figura 32 - Viscosidade rotacional.....	81
Figura 33 - Resultados do PG do CAP puro e com incorporação de teores de filer	84
Figura 34 - Índice de envelhecimento	85
Figura 35 - Módulo de cisalhamento dinâmico antes e após RTFO	86
Figura 36 - Ângulo de fase antes e após RTFO.....	87
Figura 37 - Compliância não-recuperável porcentagem de recuperação à 0,1 e 3,2 kPa .	88
Figura 38 - Diferença percentual – Jnr, diff	90
Figura 39 - Parâmetros A e B	91
Figura 40 - Número de ciclos até a falha do CAP 50/70 e dos mastiques asfálticos	92
Figura 41 - Curvas de tensão x deformação.....	93
Figura 42 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral	95
Figura 43 - Resultados do MR (MPa) instantâneo a 25°C.....	96
Figura 44 - Resultados do ensaio de Lottman modificado.....	98
Figura 45 - Resultados do ensaio de FN	100
Figura 46 – Curvas mestras das misturas asfálticas a 4°C, 20°C e 40°C	101
Figura 47 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento: a) 4°C, b) 20°C, c) 40°C.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria do filer segundo especificações do DNIT - ME 367/97	26
Tabela 2 - Composição química dos cascalhos de perfuração	34
Tabela 3 - Metais pesados em cascalhos de perfuração	35
Tabela 4 - Caracterização do CAP.....	49
Tabela 5 - Normas utilizadas para caracterização dos agregados	51
Tabela 6 - Porcentagem passante em massa (%).....	52
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de massa específica e absorção dos agregados	54
Tabela 8 - Equivalente areia dos agregados	54
Tabela 9 - Abrasão Los Angeles	55
Tabela 10 - Índice de forma	55
Tabela 11 - Adesividade	56
Tabela 12 - Massa específica real dos grãos do resíduo oleoso.....	56
Tabela 13 - Composição química do resíduo oleoso de petróleo	58
Tabela 14 - Proporção dos agregados nas curvas granulométricas	62
Tabela 15 - Propriedades volumétricas para o teor de 5%	64
Tabela 16 - Propriedades volumétricas para cada teor de ligante estimado.....	65
Tabela 17 - Propriedades volumétricas para o teor de CAP de 5,10%	66
Tabela 18 - Temperaturas de usinagem e compactação.....	67

Tabela 19 - Perda de massa	79
Tabela 20 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do RTFO.....	80
Tabela 21 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional após RTFO	81
Tabela 22 - Temperaturas de usinagem e compactação	83
Tabela 23 - Classificação do volume de tráfego baseado no valor de Jnr a 3200 kPa.....	89
Tabela 24 - Resultados do ensaio de RT	95
Tabela 25 - Resultados do ensaio de MR instantâneo a 25°C	96
Tabela 26 - Resultados do ensaio de Lottman modificado.....	97
Tabela 27 - Critérios de FN	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASTHO	American Association of State Highway Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Índice de envelhecimento
AMPT	Asphalt Mixture Performance Tester
ANM	Agência Nacional de Mineração
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Termogravimétrica
ATT	Advanced Asphalt Technologies
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cc	Coefficiente de curvatura
Cp	Corpo de prova
Cu	Coefficiente de uniformidade
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DQO	Demanda Química de Oxigênio

DRX	Difração de Raio X
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
Gmm	Densidade máxima medida
IST	Índice de Susceptibilidade Térmica
Jnr	Compliance não-recuperável
LAS	Varredura de amplitude de deformação
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
ME	Método de Ensaio
MD	Módulo Dinâmico
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	Fluência e Recuperação sob tensões múltiplas
N	Newton
Nf	Número de Ciclos até a falha
Np	Número de Giros de Projeto
P	Penetração
PA	Ponto de Amolecimento
PAV	Vaso de Pressão de Envelhecimento
PG	Grau de Desempenho
RBV	Relação Asfalto Vazios

RC	Resíduo de Cascalho
RO	Resíduo Oleoso
RRT	Resistência à tração retida
RPP	Resíduo de Polimento de Porcelanato
RT	Resistência a Tração por Compressão Diametral
RTc	RT em corpos de prova condicionados
RTFO	Envelhecimento em estufa a curto prazo
RTnc	RT em corpos de prova não-condicionados
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement System
TC	Temperaturas de Compactação
TU	Temperaturas de Usinagem
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
VAM	Volume de vazios na mistura de agregado mineral
Va	Vazios de ar
VECD	Dano contínuo viscoelástico
Vv	Volume de vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	ângulo de fase
σ	resistência à tração, a temperatura do ensaio, em MPa
$^{\circ}\text{C}$	graus Celsius
cm	centímetros
D	diâmetro
Dmm	décimos de milímetros
F	Carga de Ruptura
G*	Módulo Dinâmico de Cisalhamento
H	Altura
Hz	Hertz
Jnr	Compliança Não-Recuperável
Jnr, diff	diferença percentual entre as complianças não-recuperáveis
KPa	KiloPascal
MPa	MegaPascal
Mm	milímetros
Pa	Pascal
R	Porcentagem de Recuperação
sen	seno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS.....	22
	2.1 Objetivo geral.....	22
	2.2 Objetivos específicos	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
	3.1 Revestimentos asfálticos.....	23
	3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	24
	3.1.2 Agregado Mineral	24
	3.2 Filer.....	25
	3.2.1 Uso de resíduos como filer em misturas asfálticas	27
	3.3 Uso do cascalho de perfuração como filer em misturas asfálticas.....	31
	3.3.1 Origem do cascalho de perfuração de poços de petróleo	31
	3.3.2 Métodos de tratamentos do resíduo oleoso	35
	3.3.3 Reutilização do cascalho de perfuração na construção civil	41
	3.4 Considerações Finais	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
	4.1 Materiais	44
	4.1.1 Cimento asfáltico de petróleo.....	44
	4.1.2 Agregado graúdo	44
	4.1.3 Agregado miúdo	45
	4.1.4 Filer	45
	4.1.5 Cascalho de poços de perfuração de petróleo	46
	4.2 Métodos	46
	4.2.1 Propriedades físicas dos materiais.....	48
	4.3 Dosagem das misturas asfálticas.....	61
	4.3.1 Determinação da temperatura de usinagem e compactação	66
	4.4 Procedimentos experimentais	67
	4.4.1 Primeira etapa.....	67
	4.4.2 Segunda etapa.....	68
	4.4.3 Etapa I - Caracterização reológica	68
	4.4.4 Etapa II – Caracterização mecânica	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78

5.1	Perda de Massa	78
5.2	Viscosidade Rotacional.....	80
5.3	Grau de desempenho (PG).....	83
5.4	Fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR).....	88
5.5	Varredura linear de amplitude de deformação (LAS).....	90
5.6	Resistência a tração por compressão diametral (RT).....	94
5.7	Módulo de Resiliência (MR)	96
5.8	Resistência ao dano por umidade induzida – Lottman Modificado.....	97
5.9	Flow Number (FN)	99
5.10	Módulo Dinâmico	101
6	CONCLUSÕES.....	104
6.1	Conclusões	104
6.1.1	Conclusões dos ensaios mecânicos	104
6.1.2	Conclusões dos ensaios reológicos	105
6.2	Sugestões para pesquisas futuras	106
7	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

Em contramão ao desenvolvimento sustentável, podemos citar a indústria petroleira que segundo Santos (2010) em suas operações produz diversos resíduos, dentre eles lamas e cascalhos de perfuração, solos contaminados com óleos, entulhos de construção civil, vasilhames contaminados, sucata metálica e esgotos sanitários. Um dos subprodutos, o cascalho de perfuração, é obtido em grande quantidade na perfuração de poços de petróleo.

Os cascalhos de perfuração de poços de petróleo são fragmentos de rocha deslocados pela broca e carregados pelo fluido de perfuração no ato de perfuração de poços de petróleo. O termo cascalho é utilizado na indústria do petróleo para qualquer sedimento retirado do poço, seja ele de granulometria fina ou grossa. (MORAES, 2010) Após o processo de separação, estima-se que cerca de 10 a 15% do volume do fluido de perfuração permanece aderido aos cascalhos. (BANDEIRA, 2019)

Quando dispostos inadequadamente no meio ambiente, os resíduos gerados durante as operações de perfuração de poços de petróleo, poluem o solo, deterioram a paisagem urbana e constituem um passivo ambiental, caso sejam destinados a aterros sem tratamento prévio. (FIALHO, 2012)

Existem algumas técnicas (roadspreading, dilution burial, biotratamento, incineração, solidificação/estabilização, dessorção térmica e coprocessamento) para deposição final desse produto, entretanto, são onerosas uma vez que, o mesmo é constituído por fragmentos de rocha impregnados por fluido de perfuração, e contém metais pesados, alta salinidade, óleos e graxas além de alcalinidade. (SEVERINO *et al.*, 2015). A presença de componentes no RO com potencial poluidor ao meio ambiente, torna a sua destinação adequada fundamental.

Lucena (2008) mostrou que a utilização de cascalhos provenientes de perfuração de poços como agregado miúdo e/ou filler em misturas asfálticas representa uma alternativa para redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequado desse resíduo na natureza. Uma vez que o seu encapsulamento nos revestimentos não possibilita a lixiviação e contaminação dos solos vicinais pelos agentes nocivos ao meio ambiente. Além de mostrar melhoria nas propriedades mecânicas (estabilidade Marshall, Lottman Modificado e RT) em comparação a utilização dos filleres pó calcário e cimento.

Apesar dos resultados positivos da sua pesquisa, o estudo de Lucena (2008) foi realizado utilizando o método de dosagem Marshall que segundo Bernucci *et al.* (2010) foi concebido durante a segunda guerra mundial, pelo engenheiro Bruce Marshall que devido a falhas detectadas nesse método, vem sendo substituído por outros métodos de dosagem de misturas asfálticas.

A principal problemática da dosagem Marshall está no tipo de compactação, uma vez que neste método é realizada a compactação por impacto que após diversas observações na década de 80 percebeu-se que durante o procedimento de dosagem Marshall, produzia-se corpos de prova com densidades distintas daquelas apresentadas pelas misturas em campo e somando-se a isso a problemática do número de solicitações e da magnitude do carregamento de veículos. (GALDER, 2018)

Neste contexto, foi desenvolvido um grande estudo de dosagem de misturas asfálticas denominado Strategic Highway Research Program (SHRP) entre 1987 e 1992. Atualmente, existem trabalhos (Borges, 2019; Galder, 2018) que utilizam o método de dosagem conhecido como SUPERPAVE por melhor se aproximar da forma de compactação (por amassamento) que ocorre no campo, como também para comparar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas compactadas de acordo com cada metodologia.

A motivação para este estudo se dá influenciada pela busca da validação do reaproveitamento do resíduo oleoso da indústria petroleira no uso em misturas asfálticas. Nessa problemática propõe-se a utilização do método SUPERPAVE para dosagem das misturas asfálticas, objetivando a verificação das propriedades mecânicas delas e visando viabilizar a sua implantação em rodovias de pequeno tráfego como alternativa sustentável para deposição do cascalho residual proveniente do processo de refino de petróleo. Além disso complementa-se as análises com o estudo das propriedades reológicas, buscando entender o comportamento do mástique asfáltico formado pelo cimento asfáltico de petróleo combinado com o filer utilizado nessa pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com adição de cascalho proveniente de poços de perfuração (resíduo oleoso oriundo das atividades de exploração e produção de petróleo), visando a sua aplicação em revestimentos asfálticos de rodovias.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Verificar a resposta mecânica das misturas asfálticas com adição dos fileres (cal, resíduo oleoso) a partir de ensaios mecânicos, como: Resistência à Tração (RT), ensaio de Lottman, Módulo de Resiliência (MR) e Módulo Dinâmico (MD);
- ✓ Avaliar os efeitos da incorporação do resíduo oleoso nas propriedades reológicas dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP);
- ✓ Avaliar as misturas quanto ao melhor desempenho a deformação permanente e vida de fadiga.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo foi dedicado a abordagem de assuntos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente foi explorado o tema revestimento asfálticos objetivando entender a sua função e seus componentes. Uma de suas camadas, o filler, é abordada com maiores detalhes por se tratar do objeto principal de estudo deste trabalho. A proposta de uso do resíduo oleoso como filler motiva o estudo da sua origem, métodos de tratamento, reutilização, assuntos abordados nessa revisão de literatura afim de fundamentar este estudo.

3.1 Revestimentos asfálticos

O principal sistema logístico do país é o modal viário, concentrando a maior parte do transporte de cargas, dessa forma o revestimento asfáltico deve ser projetado de forma que as solicitações de tráfego e do clima atendam às necessidades dos usuários quanto à segurança e o conforto (RODRIGUES, 2019).

O revestimento asfáltico é uma das múltiplas camadas que compõem o pavimento asfáltico e, de maneira geral é composto por revestimento, base, sub-base e reforço de subleito, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Ilustração das camadas do pavimento



Fonte: Ferreira, 2018

Segundo Bock (2009), pavimento asfáltico apresenta um desempenho satisfatório quando proporciona conforto e segurança ao rolamento dos veículos, durabilidade, resistência às cargas, deformações, fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego e às condições climáticas. Desempenho dependente da obtenção de uma mistura com graduação adequada de agregados e de um teor ideal de cimento asfáltico de petróleo.

A mecânica dos pavimentos objetiva limitar as tensões e deformações que às cargas de tráfego induzem na estrutura do pavimento, combinando materiais e espessuras das suas

camadas constituintes. Nos pavimentos flexíveis parte desses problemas são atribuídos ao revestimento asfáltico, como trincamentos por fadiga e deformações permanentes (LUCENA, 2008).

O revestimento asfáltico é obtido por meio de mistura em usina, à quente ou a frio, envolvendo agregados e cimento asfáltico de petróleo, adequadamente proporcionados a fim de garantir o bom desempenho do pavimento visando garantir flexibilidade, estabilidade, durabilidade, impermeabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) 031/2004-ES os pavimentos asfálticos são obtidos a partir da mistura de agregado graúdo, agregado miúdo, cimento asfáltico de petróleo e filer. Podendo ser eles: convencionas, com cimento asfáltico de petróleo modificados com polímeros ou outro tipo de modificador. Os ditos convencionais são obtidos pela mistura dos agregados miúdos e graúdos, pó de pedra, filer e cimento asfáltico de petróleo; os com cimentos asfálticos de petróleo modificados são obtidos adicionando-se materiais como polímeros, óleos e ceras ao cimento asfáltico de petróleo.

3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Segundo Ferreira (2018), o revestimento asfáltico é considerado a camada “nobre” do pavimento, devido à função de aplicabilidade da mistura de agregados com o cimento asfáltico de petróleo (CAP).

O CAP é uma mistura de hidrocarbonetos de alto peso molecular provenientes da destilação do petróleo, é uma substância aglutinante e totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. A baixas temperaturas é um material semissólido, viscoelástico a temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (BERNUCCI *et al.*, 2010).

3.1.2 Agregado Mineral

A terminologia dos agregados é determinada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9935/2011. Os agregados são materiais granulares que podem ser obtidos por meio de desmonte, escavação e dragagem de depósitos diversos, podendo ser eles continentais, marinhos, estuários ou de rios (MEDEIROS, 2019).

Os agregados minerais são materiais sem forma e volume definidos, geralmente inertes que são selecionados por suas propriedades serem adequadas para a produção de misturas asfálticas. Na pavimentação eles podem ser classificados quanto a sua natureza, tamanho dos grãos e quanto mineralogia (PINTO, 2006).

Prudente (2015), afirma que quanto a natureza, os agregados podem ser são classificados em natural, artificial e reciclado. Os agregados naturais são provenientes de processos convencionais a partir de fontes de ocorrência natural, os artificiais são resíduos de processos de britagem ou fabricados objetivando alto desempenho; e os reciclados, são provenientes do reuso de materiais diversos.

Quanto a mineralogia, as composições mineralógicas e estruturas cristalinas específicas aumentam ou diminuem a afinidade do agregado com a água. A quantidade de sílica (SiO_2) presente nos agregados influencia na afinidade com a água e, portanto, a afinidade é elevada à medida que o teor de sílica cresce, demonstrando necessidade de analisar a sensibilidade aos danos por umidade nas misturas asfálticas. Logo, as características físicas dos agregados são de suma importância na produção de misturas asfálticas, uma vez que os mesmos são responsáveis pela resistência adesiva (FURLAN *et al.*, 2004).

Para direcionar a escolha adequada de materiais capazes de resistir às cargas as quais o pavimento será submetido faz-se necessário a caracterização dos agregados. (LOPES, 2010) Por estar relacionada ao entrosamento entre as partículas e o conseqüente atrito entre elas, a distribuição granulométrica assegura a estabilidade da camada de revestimento asfáltico (Bernucci *et al.*, 2010).

3.2 Filer

Por definição da norma DNIT-ME 367/97 o material de enchimento (filer) possui uma massa passante, peneira com abertura de malha quadrada, de pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm, sendo um material inerte em relação aos demais componentes da mistura. A norma DNIT-ME 367/97 preconiza os limites para granulometria do filer de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Granulometria do filer segundo especificações do DNIT - ME 367/97

Abertura da malha	%, em peso,
(mm)	Passando
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

Fonte: DNIT – ME 367/97

Dentre as vantagens da incorporação do filer nas misturas asfálticas, de acordo com Oliveira (2015), é que além de preencher os vazios, este aumenta a viscosidade e o ponto de amolecimento e reduz a penetração do CAP. Outro de seus aspectos é o aumento da uniformidade das misturas e a diminuição da susceptibilidade térmica.

O filer é um componente da mistura asfáltica que tem como finalidade preencher os vazios entre os agregados graúdos e também alterar as propriedades dos cimentos asfálticos de petróleo, agindo como parte ativa da combinação cimento asfáltico de petróleo, filer e ar. Este serve, como lubrificante das partículas dos agregados maiores, afetando os vazios do agregado, as características de compactação e teor ótimo do CAP (BARDINI et. al, 2010).

Essa mistura do cimento asfáltico de petróleo, agregados e filer de acordo com Rodrigues (2019) é uma atividade complexa que objetiva balancear a susceptibilidade da mistura asfáltica a defeitos ao pavimento por meio da escolha do teor de asfalto de projeto e a distribuição granulométrica pré-definida.

Nessa etapa de mistura as características de volume de vazios de ar (V_a), a relação asfalto vazios (RBV) e o volume de vazios na mistura de agregado mineral (VAM) são ponderados na associação de fileres com cimento asfáltico de petróleo para formação do mástique que por sua vez, serve de lubrificante entre agregados de maior dimensão, alterando o volume de vazios da mistura de agregado mineral, e assim modificando as características de compactação e teor de asfalto de projeto (RODRIGUES, 2019).

Adições de filer nas misturas asfálticas, findam por formar uma massa (CAP+Filer) denominada mástique asfáltico, assim além de material de enchimento os fileres adicionados à mistura têm a função de aumentar a viscosidade do CAP, gerando incremento no ponto de amolecimento, da estabilidade, do módulo de resiliência e da resistência, melhorando o desempenho reológico, mecânico, susceptibilidade térmica e sensibilidade à água (BALDO, 2007).

Segundo Bardini et.al (2010) a qualidade do mástique influencia todas as respostas mecânicas das misturas asfálticas, assim como a sua trabalhabilidade. A exemplo disso temos o processo de fadiga, fortemente relacionado as características do cimento asfáltico de petróleo, às propriedades do filer e a interação físico-química entre os dois, que é afetada, principalmente, pela finura e características de superfície do filer.

3.2.1 Uso de resíduos como filer em misturas asfálticas

Resíduos provenientes de diferentes ramos industriais vem sendo utilizados por diversos pesquisadores, dentre eles: Freitas (2010), Xavier (2016), Eing (2018). Uma vez que ao serem adicionados ao asfalto promovem melhorias no seu desempenho, além de fornecer um destino ambientalmente correto aos resíduos gerados (GOUVEIA, 2013).

3.2.1.1 Resíduo de gesso como filer em misturas asfálticas

Originado da calcinação da gipsita, o gesso (Figura 2) é um sulfato de cálcio hidratado cuja fórmula química é $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, possui baixa densidade, pode ser riscado facilmente, é solúvel em água e sua cor é variável entre incolor, branca, cinza ou amarronzada. Sua maior aplicação ocorre no âmbito da construção civil, sendo também a maior geradora desse resíduo (FREITAS, 2010).

Figura 2 - Deposição de resíduos de gesso



Fonte: Meio Ambiente, 2014.

Freitas (2010) obteve resultados satisfatórios no uso de gesso como material de enchimento em misturas betuminosas do tipo mistura asfáltica usinada a quente, uma vez que o material apresentou uma granulometria adequada para esse fim, é não solúvel quando imerso em querosene (inerte), apresentou redução do consumo de CAP da ordem de 10,8% nas misturas com 2 e 4% de gesso. Além disso, as características mecânicas analisadas na mistura com 2% do material atenderam os requisitos mínimos normativos.

Gouveia (2013) considerou adequado o uso do gesso como filer, pois provavelmente o gesso irá atuar na mistura como filer ativo, formando o “mástique”, aumentando a viscosidade e o ponto de amolecimento do CAP, além de diminuir os efeitos da suscetibilidade térmica do mesmo devido a 90% dos grãos serem menores que 20 µm. A adição desse material promoveu melhorias nas principais características mecânicas requeridas ao pavimento, sendo os melhores resultados para aquelas misturas contendo maiores percentuais de gesso (60%, 80% e 100%) em substituição ao percentual de filer.

3.2.1.2 Uso de cinza volante como filer

Proveniente da queima do carvão mineral, a cinza volante é um rejeito do processo de produção de energia elétrica nas usinas termelétricas. O seu uso em misturas asfálticas vem atrelado à preocupação ambiental em produzir alternativas tecnológicas que possam reduzir os impactos ambientais e a quantidade de resíduos gerados nos mais diversos serviços, além disso existe a possível vantagem técnica de redução da suscetibilidade ao dano por umidade (FREITAS, 2019).

As cinzas volantes Figura 3, podem ser transportadas pela ação do vento, por se tratar de materiais relativamente leves, podendo vir a contaminar o ar e áreas das usinas onde são geradas ou depositadas, poluindo também o solo e o lençol freático. Silva (2011), relata que esses resíduos até o ano de 1990 eram dispostos em depósitos dos arredores das fontes geradoras, no entanto devido à pressão da sociedade e órgãos governamentais atualmente sua destinação são depósitos, bacias de decantação e cavas de minas desativadas, visando minimizar os danos ambientais.

Figura 3 - Cinza volante

Fonte: Boyes, 2011.

Uma alternativa para disposição final das cinzas volantes é o seu uso como material de enchimento em misturas asfálticas. Eing (2018), avaliou o impacto da inserção de cinza volante na dosagem de misturas asfálticas densas concluindo que ocorre um decréscimo do desempenho, entretanto este não inviabiliza o uso da cinza em misturas asfálticas densas.

No estudo realizado por Xavier (2016), o uso das cinzas volantes apresentou uma economia no teor de CAP obtido durante a dosagem das misturas asfálticas, frente à mistura de referência, além disso a associação das cinzas volantes com a cal gerou um aumento de rigidez que refletiu em um incremento da resistência à tração e atingiu o limite mínimo de Resistência à Tração (RRT) no ensaio de Lotman sendo responsável pela resistência ao dano por umidade induzido das misturas asfálticas.

Na pesquisa realizada por Asmael (2010), misturas asfálticas com cinza volante como filer apresentaram menor resistência à tração ao se comparar as misturas contendo cimento Portland ou sílica, além disso a autora afirma que pavimentos com elevadas quantidades (acima de 9,8 %) de cinza volante apresentam trincas durante a sua execução.

3.2.1.3 Resíduo de polimento de porcelanato como filer

Oriundo da etapa de polimento de porcelanato, o resíduo de polimento de porcelanato (RPP), é constituído de uma mistura de material cerâmico proveniente do porcelanato e material abrasivo, originário das máquinas polidoras, geralmente composto por carbeto de silício aglomerados por cimentos à base de cloretos de magnésio ou partículas de diamante que apesar do seu potencial de aplicação, ele é descartado diretamente em aterros (BREITENBACH *et al.*, 2017).

Segundo Steiner (2014), os resíduos sólidos (Figura 4) resultantes do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos são resultantes, principalmente, das linhas de produção, denominadas “raspas” podendo também ser provenientes da lavagem do piso da fábrica, com isso a indústria cerâmica vem buscando soluções técnicas e ambientais para reduzir a produção desses resíduos e a sua reutilização no ciclo de produção.

Figura 4 - Resíduo de Polimento de Porcelanato

Fonte: Scheffer, 2017.



Na pesquisa feita por Scheffer (2017), o RRP promoveu uma redução significativa no teor de cimento asfáltico de petróleo que foi de 6,98% quando comparado a mistura de referência e de 5,88% em comparação a mistura com adição de cal, além disso está manteve uma alta resistência à tração e um percentual de desgaste semelhante ao das misturas com maior quantidade de cimentos asfálticos de petróleo em sua composição. Logo, de modo geral, a mistura com RRP apresentou melhorias, demonstrando potencial a ser estudado para colaborar com a gestão desse resíduo.

3.2.1.4 Rejeito de minério de ferro como filer

Segundo Campanha (2011), na atividade de exploração mineral, há geração de materiais de pouco ou nenhum valor econômico, cuja disposição adequada do mesmo constitui um importante condicionante que influencia a viabilidade do projeto de aproveitamento ambiental. Os materiais considerados inapropriados para uso, chamados de minérios pobres são normalmente dispostos em pilhas de estéril e além desses, existe os rejeitos que por serem gerados na forma de lama ou pasta, a destinação tradicional tem sido o lançamento em barragens de disposição de rejeitos.

No que diz respeito ao risco do uso de barragens de rejeitos como forma de destinação final desse tipo de material, no Brasil temos os acidentes históricos das barragens de Brumadinho – MG (2019), Mariana – MG (2015) que causaram perdas irremediáveis e fez com

que mudasse a percepção da Agência Nacional de Mineração (ANM), no que se refere à segurança de barragens de rejeitos de mineração.

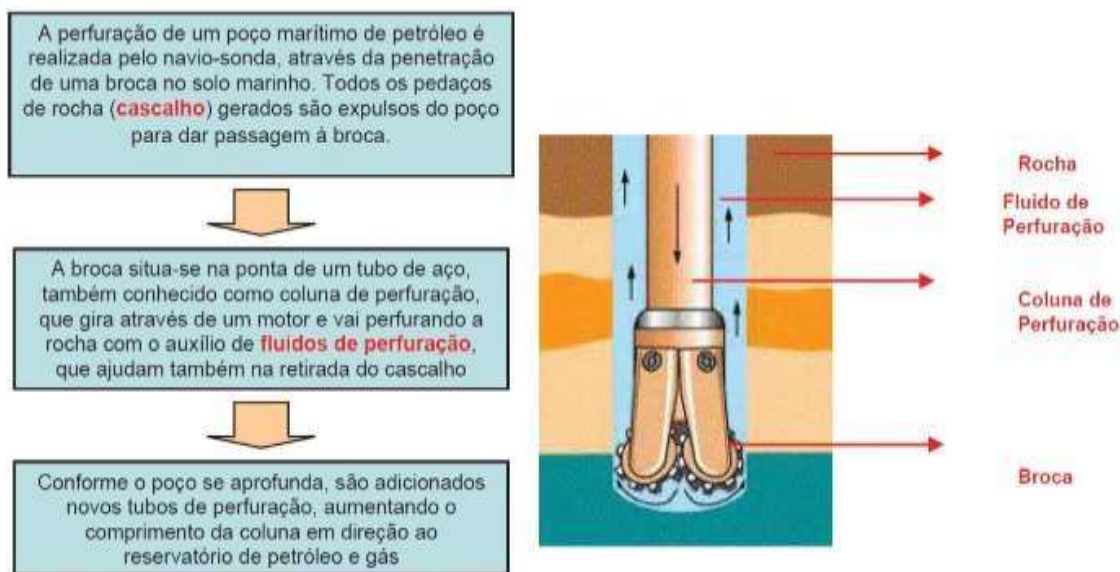
No estudo de Silva (2010), ao utilizar o minério de ferro como filer alternativo verificou-se que ele possui valor de densidade elevado devido, principalmente à presença de ferro na sua composição, além disso constatou-se que a sua utilização contribuiria para redução desse resíduo nas barragens de rejeito, cooperando dessa forma para conservação ambiental.

3.3 Uso do cascalho de perfuração como filer em misturas asfálticas

3.3.1 Origem do cascalho de perfuração de poços de petróleo

A broca da coluna de perfuração tritura as formações geológicas, durante a perfuração de um poço de petróleo (Figura 5), gerando o cascalho. Este é transportado até a superfície por meio do chamado fluido de perfuração expelido pela broca por meio de pequenos orifícios (MORAES, 2010).

Figura 5 - Esquema de perfuração de poço



Fonte: RIMA (PETROBRAS), 2010.

Movimentos de rotação e pesos aplicados sobre a broca são os responsáveis por produzir a energia necessária para perfurar as diferentes formações geológicas, por meio de sonda constituída por vários sistemas com funções específicas. As pequenas lascas, ou cascalhos, removidos do poço e carreados pelo fluido de perfuração até a superfície são provenientes da desagregação e ruptura das rochas (FAGUNDES, 2018).

O volume nominal de cascalho gerado em perfurações de poços de petróleo varia em função da profundidade do poço, do diâmetro do poço e das características geológicas das formações rochosas perfuradas. Esse volume nominal é teoricamente o volume geométrico do poço perfurado, sendo muitas vezes acrescido de 20% por segurança, devido a eventuais desabamentos em razão das perfurações (SILVA, 2018).

Segundo Fialho (2012), o volume de cascalho gerado a cada 100 metros de perfuração corresponde a aproximadamente 13 metros cúbicos de cascalho produzidos.

Segundo Rangel (2015), os fragmentos de rocha impregnados de fluidos usados durante a perfuração, comumente denominado de cascalho de perfuração de poços de petróleo é um resíduo classificado como heterogêneo, perigoso, com concentração significativa de hidrocarbonetos, metais pesados e sais insolúveis em água.

3.3.1.2 Contaminantes provenientes do fluido de perfuração do cascalho

Nas diversas fases da perfuração de poços de petróleo são utilizados diferentes tipos de fluidos de perfuração podendo apresentar diversos aspectos dependendo do estado físico dos constituintes na mistura, fluidos quem pode formar misturas de sólidos, líquidos, aditivos químicos, e/ou gases (NETO, 2017).

Segundo Fagundes (2018), os fluidos de perfuração podem ser de base aquosa, oleosa ou à base de ar/gás sendo que os de base de óleo (derivados do petróleo) apresentam a desvantagem da onerosidade e de ser um contaminante agressivo no descarte do cascalho.

Barros (2015), classifica os fluidos de perfuração em função da sua composição, baseando-se na sua principal fase constituinte:

- Fluidos à base de água: a fase contínua é representada pela água doce, dura ou salgada. Promover o meio de dispersão para os materiais coloidais (principalmente argilas e polímeros) é a sua principal função, esses materiais controlam a viscosidade, limite de escoamento, dentre outros aspectos, conferindo ao fluido uma boa taxa de remoção dos sólidos perfurados e capacidade para estabilizar as paredes do poço;
- Fluidos à base de óleo: na sua fase contínua ou dispersante, apresentam uma fase óleo, possui teor de água variando de 10 a 45%. Em relação ao fluido água possui algumas vantagens, porém é empregado com menor frequência devido ao elevado custo e grau de poluição;

- Fluidos à base de ar: é um termo genérico aplicado quando ar ou gás é utilizado total ou parcialmente como fluido circulante na perfuração rotativa. Possui baixa densidade e é usado em zonas com perdas de circulação severas e formações produtoras com pressão muito baixa ou com grande susceptibilidade a danos, assim como em formações duras, em regiões com escassez de água ou regiões glaciais, com camadas espessas de gelo.

A mistura de fluido e cascalho ao ser bombeada para fora do poço, é processada em peneiras vibratórias, desareizador, mud cleaner e centrífuga para que ocorra a reutilização do fluido no poço. Fluidos à base de óleo promovem a contaminação do cascalho o que impossibilita que o descarte do mesmo no meio ambiente seja feito sem tratamento prévio (SILVA, 2018).

Contaminações dos cascalhos durante a sua descoberta na forma de óleo cru ou fluido podem ocorrer devido à presença de hidrocarbonetos que são parcialmente removidos por meio de um sistema de controle de sólidos, porém essa remoção é apenas parcial o que pode ser detectado em análises térmicas e de composição elementar que são capazes de detectar a presença e os teores de hidrocarbonetos que podem estar presentes no cascalho (FIALHO, 2012).

De acordo com Marques (2011), os fluidos de perfuração, em sua maioria têm em sua composição sais que contribuem para a alta salinidade, esses sais tem o objetivo de minimizar o inchamento das formações argilosas perfuradas, promovendo a estabilidade do poço, assim sais solúveis, como cloreto de sódio e cloreto de potássio, fazem parte da composição básica dos fluidos de perfuração de poços de petróleo. Sais esses que uma vez dispostos no solo, dissolvidos nos resíduos de perfuração, podem trazer consequências graves ao meio ambiente.

As proporções e os metais presente vão depender da composição química do fluido contaminante, expressa nos óxidos mais estáveis, e os metais pesados detectados nos cascalhos in natura, alguns estudos fazem essa quantificação, como pode ser visualizado nas Tabelas 2 e 3 de maneira resumida.

Tabela 2 - Composição química dos cascalhos de perfuração

Determinação (%)	SOUSA	MOTA	MEDEIROS	JÚNIOR
	(2017)	(2018)	(2010)	(2017)
	(%)	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	46,72	37,19	36,5	40,3
Al ₂ O ₃	10,13	10,87	11,5	7,9
Fe ₂ O ₃	5,33	5,66	4,5	3,2
BaO	0,99	2,34	N.A.	1,6
CaO	20,46	11,01	35,3	28,1
MnO	N.A.	N.A.	0,09	N.A.
MgO	1,34	2,56	N.A.	4,5
K ₂ O	2,48	2,84	2,7	3,5
Na ₂ O	N.A.	2,08	N.A.	4,3
TiO ₂	0,56	0,70	0,81	0,4
P ₂ O ₅	N.A.	0,21	N.A.	0,3

Nota: N.A. – Não apresentado

Fonte: Autor.

Estão incluídos nos contaminantes apresentados hidrocarbonetos e metais pesados como arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, prata e selênio, e altos índices de cloretos, óleos e graxas, elementos que causam demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e elementos que causam alcalinidade.

Tabela 3 - Metais pesados em cascalhos de perfuração

Concentrações de metais pesados	ABBE et. al (2009) - (ppm)	MEDEIROS (2010) (%)	LEONARD e STEGEMANN (2010) (mg/kg)
As	11,8	N.A	5
Cd	0,3	N.A.	21
Cr	116,0	N.A.	106
Cu	32,9	0,02	44
Ni	65,0	N.A.	38
Pb	11,2	N.A.	150
Zn	125,0	0,03	82
Ba	N.A	N.A.	51500
V	N.A	N.A.	108
Mn	N.A	N.A.	345
Sr	N.A	N.A.	930

Nota: N.A. – Não apresentado

Fonte: Fialho, 2012.

3.3.2 Métodos de tratamentos do resíduo oleoso

Conhecer a caracterização física do solo e os contaminantes ali existentes é fundamental antes que ocorra a disposição final do cascalho de perfuração de poços de petróleo no meio ambiente, de modo que o tratamento é selecionado de acordo com a toxicidade do mesmo para o meio natural, a legislação local e decisão da empresa geradora (BANDEIRA, 2019).

Atualmente, dentre as opções de tratamento/destino aplicável a esses resíduos oleosos tem-se: roadspreading, dilution burial, biotratamento, incineração, solidificação/estabilização, dessorção térmica e coprocessamento.

3.3.2.1 Roadspreading

Roadspreading (Figura 6) é uma tecnologia que consiste basicamente no espalhamento do resíduo oleoso das atividades de exploração de petróleo em leitos de estradas, misturando ao material argiloso. Segundo, Santos (2010) uma técnica semelhante a essa vem sendo utilizada na região norte do estado do Espírito Santo, aplicando-se resíduo oleoso proveniente das atividades de perfuração de poços de petróleo e misturando a argila, em estradas de terra semelhante a tecnologia de roadspreading.

Figura 6 - Execução da técnica de Roadspreading



Fonte: Fonseca, 2003.

De acordo com Fonseca (2003) o procedimento de misturar o resíduo oleoso à argila vem sendo aplicado nos últimos cinco anos em áreas próximas às atividades da Petrobras, sendo as estradas que recebem o resíduo oleoso como pavimento aquelas onde ocorre o tráfego de carretas de óleo produzido na região.

Alguns problemas vêm sendo detectados na técnica utilizada pela Petrobras de aplicar resíduo oleoso em leito de estradas de terra, Fonseca (2003) enumera alguns desses problemas, sendo eles:

- Ausência de segregação dos resíduos e sua caracterização específica; e
- Ausência de monitoramento da região, principalmente de material do leito das estradas pavimentadas com o RO e seu entorno, incluindo águas subterrâneas e superficiais.

Ao decidir aplicar a técnica de roadspreading, devem ser observados alguns fatores cuidadosamente durante o processo de disposição do resíduo, no que diz respeito, as práticas do pessoal, os materiais e equipamentos utilizados, a estimativa dos custos que resultem, bem como a observância da minimização dos impactos ambientais. (FONSECA, 2003)

3.3.2.2 Dilution Burial

Essa técnica consiste em misturar o solo disponível nas adjacências do local de aplicação com resíduos ou solo contaminados, a mistura é geralmente enterrada em trincheiras com pelo menos 1,5 m de solo não contaminado cobrindo o solo misturado ao resíduo, esse método objetiva reduzir os contaminantes para os níveis aceitáveis. (LUCENA, 2008) A redução dos níveis dos constituintes ocorre por meio de diluição e alteração química dos constituintes.

3.3.2.3 Biotratamento

Em resíduos oleosos de petróleo alguns compostos orgânicos presentes podem ser biodegradados em processos naturais para óxido de carbono e água, entretanto a biodegradação natural de contaminantes tende a uma taxa limitada em razão dos processos biológicos, sendo os processos de biotratamento mais utilizados: landfarmings e biopilhas (LUCENA, 2008).

Na década de 80, uma das principais soluções adotadas foi a técnica de espalhamento de borras oleosas em grandes áreas (landfarmings), misturando-as com o solo, nutrientes (N, P, K) e calcário, facilitando, assim, sua degradação por organismos presentes no solo (MENDES, 2019).

Hu *et al.* (2013) cita as principais vantagens e desvantagens do uso de landfarmings para tratamento de resíduos oleosos:

- Vantagens:

- Custos relativamente baixos;
- Não demanda muitas manutenções;
- Grande capacidade de tratamento.

- Desvantagens:

- Processo muito lento (6 meses a 2 anos);
- Os poluentes podem se acumular por aplicações repetidas;
- Problemas de emissões de componentes voláteis;
- Risco de poluição das águas subterrâneas;
- Ocupam uma grande área de terra.

Entretanto, na década de 90 ocorreu a progressiva saturação dos landfarmings constatando que os problemas causados por chuvas, aeração e homogeneizações incorretas das misturas começaram a aumentar os riscos ambientais e, por conseguinte, impedir a expansão das refinarias.

A tecnologia das Biopilhas consiste em estimular a atividade microbiana aeróbia dentro de células ou pilhas de solo contaminado, por meio de uma aeração eficiente. Adição de água e nutrientes como fontes de nitrogênio e de fósforo, podem aumentar a atividade microbiana. Microrganismos estes que degradam os hidrocarbonetos absorvidos nas partículas de solo, reduzindo, assim, suas concentrações (VIOTTI, 2017).

Hu *et al.* (2013) cita as principais vantagens e desvantagens do uso de biopilhas para tratamento de resíduos oleosos:

- Vantagens:

- Capacidade de tratamento relativamente alta;
- Processo mais rápido que o landfarming;
- Requer menos área;
- Funciona em regiões frias e diversos terrenos.

- Desvantagens:

- Alto custo;
- Menos capacidade de tratamento que o landfarming;

3.3.2.4 Incineração

Segundo Bandeira (2019), a incineração é um processo cujos resíduos perigosos sofrem oxidação e são convertidos por meio do oxigênio presente no ar, em gases e resíduos sólidos incombustíveis. Sendo recomendado como tratamento para resíduos perigosos que não podem ser reutilizados, reduzidos ou dispostos em um aterro.

Lucena (2008) aponta a necessidade de um gerenciamento dos resíduos sólidos remanescentes do processo de incineração. Uma vez que quando estes contêm compostos orgânicos, há um aumento das concentrações de metais e são requeridas estabilizações para prevenção da liberação por lixiviação de compostos nocivos ao ambiente. Essas emissões gasosas de compostos químicos decorrentes da incineração fizeram com que esse tratamento de resíduos tornasse um dos mais combatidos pelos ambientalistas.

3.3.2.5 Solidificação/Estabilização

Também conhecido como estabilização, o processo de solidificação é uma técnica capaz de encapsular resíduos inorgânicos, o encapsulamento consiste na imobilização dos resíduos perigosos transformando-os e mantendo-os em suas formas menos solúveis ou tóxicas confinados em cápsulas, partículas ou blocos (LUCENA, 2008).

Esse processo é uma alternativa viável para o tratamento de resíduos. A estabilização por solidificação emprega aditivos para reduzir a mobilidade dos poluentes, de forma a torná-los materiais não perigosos e aceitáveis de acordo com as normas ambientais vigentes (LIMA, 2018).

Segundo Simião (2011) é comum a utilização desse tratamento para resíduos perigosos gerados em grandes quantidades, entretanto pode se fazer uso dessa técnica para alguns resíduos não perigosos, onde nessa situação o tratamento é empregado quando objetiva facilitar o manuseio do resíduo ou dificultar a perda de constituintes indesejados que possam vir a contaminar águas subterrâneas ao ser dispostos no solo.

Brito (2007) cita as duas vias que basicamente são responsáveis por reduzir a mobilidade dos contaminantes no processo de estabilização/solidificação:

- Retenção em uma matriz sólida que restringe fisicamente sua mobilidade;
- Transformação química em uma forma menos solúvel.

Decidir tecnicamente e economicamente pelo uso desta tecnologia, uma vez que a solidificação/estabilização não é uma forma de tratamento que se justifica para qualquer tipo de resíduo, deve ser embasada em dados sobre a composição química e propriedades físicas, quantidade, localização e problemas de disposição associados (LUCENA, 2008).

Comumente justifica-se esse tipo de tratamento para resíduos classificados como perigosos (ou Classe I) que são gerados em grandes quantidades, Agostini (2002) cita os resíduos perigosos considerados tradicionalmente adequados para esse tratamento, como sendo os seguintes:

- Resíduos contendo íons metálicos ou semimetais;
- Resíduos oleosos à base de solventes, tais como solventes usados, fundo de tanques de destilação e resíduos de refinarias;
- Resíduos aquosos contendo 1% a 20% ou mais de substâncias orgânicas (emulsões), solúveis ou insolúveis, não listadas como perigosas pela legislação, a não ser por suas características de instabilidade, e
- Resíduos aquosos contendo baixos teores de poluente orgânicos listados como perigosos - menos de 1% e, usualmente na faixa de 10 a 1000 mg/L (exemplo: pentaclorofenol ou bifenilas oplicloradas)

3.3.2.6 Dessorção Térmica

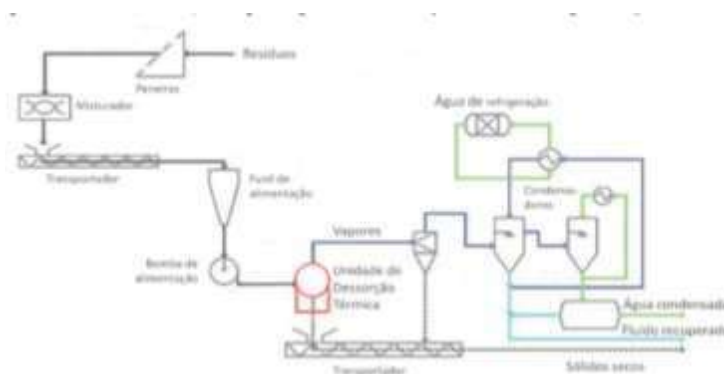
A técnica de dessorção térmica utiliza elevadas temperaturas para promover a evaporação dos fluidos aderidos que são posteriormente condensados e recuperados. O cascalho de perfuração é aquecido até atingir a temperatura e destilação da fase contaminada (fase sintética: parafina + olefinas) e mantida para garantir a evaporação total desses componentes (SILVA, 2019).

Segundo Pereira (2010), a dessorção é um processo que objetiva produzir sólidos livres ou com baixíssimo teor de fluido e posterior recuperação do mesmo para reutilização em poços de petróleo por meio de um processo de evaporação do fluido aderido ao cascalho.

No processo de dessorção térmica (Figura 7) água e óleo aderidos aos sólidos de perfuração evaporam. A energia suficiente para remover e separar a emulsão água e óleo é obtida por meio do calor necessário para evaporar o conjunto água e óleo. Por meio da destilação o óleo puro e emulsificado e a água são removidos por destilação, no processo a água

evapora primeiro produzindo vapor e a fase orgânica, que tem maior ponto de ebulição, evapora depois da água. A produção de vapor também pode ajudar no abaixamento do ponto de ebulição da fase orgânica (PEREIRA, 2010).

Figura 7 - Unidade de dessorção térmica convencional



Fonte: Ferreira, 2010.

3.3.2.7 Coprocessamento

O coprocessamento é uma destinação final que vem sendo utilizada, é uma tecnologia em âmbito nacional regulamentada pelo CONAMA 264/99 que contribui para a preservação de recursos naturais, sendo considerada uma das mais eficientes, nesta a destinação final de resíduos ocorre a alta temperatura em fornos de clínquer (fabricas de cimento) ou fornos de cal podendo os resíduos serem aproveitados como combustíveis (SIMIÃO, 2011).

Na sua pesquisa Sousa (2013), aborda o uso de fornos de clínquer para aplicação da técnica de coprocessamento com o resíduo de cascalho de perfuração onde a autora constatou que o coprocessamento com o cascalho de perfuração é considerado uma alternativa economicamente viável para as empresas envolvidas, onde os benefícios socioambientais são evidentes e podem ser definitivos, uma vez que serão incorporados ao produto final: o cimento.

3.3.3 Reutilização do cascalho de perfuração na construção civil

Marques (2011) estudou características e propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento formulados a partir de misturas binárias e ternárias de cimento Portland, areia, água, com e sem adição de cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo, e seus resultados experimentais comprovaram a eficiência e o elevado potencial de utilização, demonstrando o tijolo de solo-cimento-resíduo com uma maior resistência mecânica e menor absorção de água.

Barros (2015), incorporou resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo na massa padrão para fabricação de cerâmica vermelha, os resultados mostraram que é possível a utilização do resíduo para a fabricação de produtos da cerâmica vermelha (telhas, tijolos maciços e tijolos furados) substituindo-se a argila em até 40%, atendendo aos requisitos exigidos pela norma e pela literatura para as propriedades tecnológicas do produto final gerado por essa substituição.

Bandeira (2019) observou que inserindo o índice de 10% de cascalho de perfuração de petróleo, em substituição parcial do agregado miúdo areia, utilizando 5,0% de teor de CAP, a mesma pode realizar uma avaliação geral da utilização do cascalho na composição da mistura asfáltica, concluindo que nas proporções estudadas esta mistura apresenta viabilidade técnica para o uso em camadas de rolamento de asfalto, faixa C, atendendo parâmetros técnicos da legislação vigente e obedecendo critérios ambientais.

Lucena (2008) utilizou o cascalho tanto como filer quanto como agregado miúdo obtendo resultados que corroboraram a hipótese apresentada de que “os cascalhos de perfuração provenientes da perfuração de poços de petróleo podem ser utilizados em revestimentos asfálticos como agregado miúdo e/ou filer”, onde o resíduo oleoso apresentou melhorias das propriedades da mistura asfáltica, em todos os ensaios realizados, em comparação com o filer cimento Portland demonstrando-se assim como uma alternativa para o problema ambiental gerado pelo descarte desse resíduo.

3.4 Considerações Finais

A revisão bibliográfica deste trabalho apresenta desde os conceitos básicos da funcionalidade de um pavimento asfáltico, permeando pela função de cada material que o forma e sua importância no esqueleto da mistura que compõe o revestimento asfáltico (camada responsável por receber e transmitir os esforços para as demais camadas).

Ao longo do texto enfatiza-se a importância do filer (componente que tem a finalidade de preencher os vazios entre os agregados graúdos e miúdos) sendo um componente ativo na combinação CAP, filer e ar. Convencionalmente o cimento, a cal ou o pó de pedra são usualmente utilizados para exercer essa função em misturas asfálticas. Entretanto, nesse estudo são apresentadas pesquisas que utilizam materiais diversos exercendo essa função de filer.

Nessa pesquisa propõe-se uso do cascalho de perfuração de poços de petróleo como material de enchimento nas misturas asfálticas. Sendo analisados os possíveis benefícios mecânicos e oferecendo uma alternativa ambientalmente viável para o descarte desse resíduo altamente danoso ao meio ambiente.

A pesquisa de Lucena (2008) foi uma bússola que norteou os resultados esperados em relação aos benefícios que uso do cascalho de perfuração podem trazer as misturas asfálticas. Ao final do trabalho espera-se validar o uso do cascalho como filer em misturas asfálticas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo foi dedicado a descrição dos materiais utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados, e do cimento asfáltico de petróleo, assim como os procedimentos utilizados para estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Os métodos de ensaio seguiram as normas do DNIT, ABNT, American Society for Testing and Materials (ASTM).

4.1 Materiais

4.1.1 Cimento asfáltico de petróleo

O cimento asfáltico de petróleo utilizado nesta pesquisa foi classificado como CAP 50/70 (Figura 8), fornecido pela Rocha Cavalcante de Campina Grande – PB.

Figura 8 - CAP 50/70



Fonte: Autor, 2021.

4.1.2 Agregado graúdo

Nesta pesquisa, como agregados graúdos foram utilizados a brita 19mm e a brita 12,5mm, de origem granítica ambos foram fornecidos pela pedreira Brita Forte localizada na PB 032 – km 03 – Sítio Bela Rosa – Pedra de Fogo – PB (Figura 9). As amostras foram selecionadas de acordo com o método B da norma DNIT – PRO 199/66.

Figura 9 - Agregados graúdos usados na pesquisa



(a)

Brita 19mm



(b)

Brita 12,5mm

Fonte: Autor, 2021.

4.1.3 Agregado miúdo

Os agregados miúdos utilizados foram o pó de pedra e a areia (Figura 10). Os materiais foram fornecidos pela A&C localizada em Sta. Rita – PB.

Figura 10 - Agregados miúdos usados na pesquisa



(a)

Areia



(b)

Pó de pedra

Fonte: Autor, 2021.

4.1.4 Filer

Para a mistura asfáltica o filer (Figura 11) usado foi a cal que foi obtida no mercado local de Campina Grande – PB.

Figura 11 - Filer



Fonte: Autor, 2021.

4.1.5 Cascalho de poços de perfuração de petróleo

O cascalho de perfuração de poços de petróleo (Figura 12) utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela Petrobras, proveniente da perfuração de um poço de petróleo offshore do estado de Sergipe.

Figura 12 - Cascalho de perfuração de petróleo



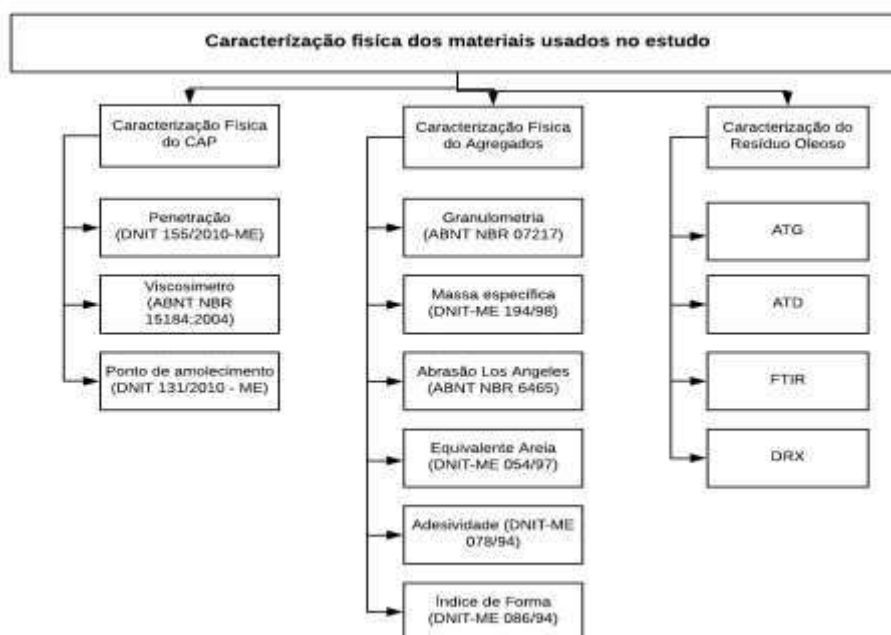
Fonte: Autor, 2021.

4.2 Métodos

A parte experimental da pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP, localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Os ensaios foram realizados de acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infraestrutura e Transportes (DNIT). O Fluxograma apresentado na Figura 13 mostra o programa experimental adotado para pesquisa.

Figura 13 - Fluxograma de caracterização física da pesquisa



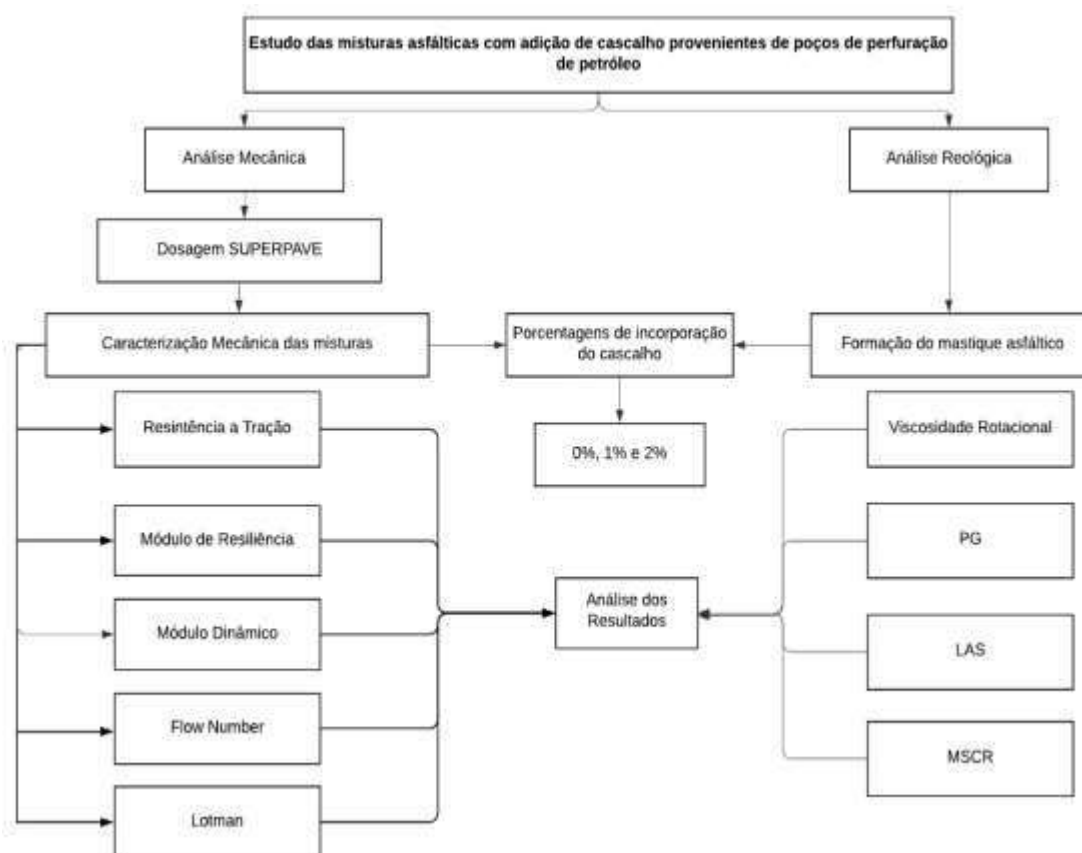
Fonte: Autor, 2021.

Após a realização da caracterização dos materiais, foi obtido o teor ótimo de cimento asfáltico de petróleo por meio da dosagem SUPERPAVE. E a partir das curvas Fuller o teor de 2% de filler (cal) foi determinado. Com isso foram moldados corpos de prova com as seguintes porcentagens de filleres: 2% de cal; com a substituição parcial da cal pelo resíduo (1% cal + 1% de RO) e a substituição total da cal pelo resíduo (2% de RO). Com isso, foi possível realizar a análise das propriedades mecânicas com os diferentes teores do resíduo.

Para compreensão das propriedades reológicas do mástique asfáltico, foram realizadas a formação dos mástiques asfálticos em três teores, sendo a combinação de 2% de RO, 1% de RO + 1% cal e 2% cal.

A Figura 14 ilustra por meio de quais ensaios foi realizada a caracterização mecânica e reológica nesta pesquisa.

Figura 14 - Sequência de Atividades da pesquisa



Fonte: Autor, 2021.

4.2.1 Propriedades físicas dos materiais

4.2.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo

A caracterização física do cimento asfáltico de petróleo utilizado nessa pesquisa está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização do CAP

Ensaio	Unid.	Limites CAP CAP 50-70	Resultados
Penetração (100g, 5s, 25°C)	Dmm	50-70	50
Ponto de amolecimento, mín	°C	46	49
Viscosidade Brookfield	Cp		
Viscosidade Rotacional a 135°C, SP 21, mín., 20 rpm	Cp	274	422
Viscosidade Rotacional a 150°C, SP 21, mín., 20 rpm	Cp	112	205
Viscosidade Rotacional a 177°C, SP 21, mín., 20 rpm	Cp	57-285	77
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5 a +0,7)	-1,5
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min			
Variação em massa, máx	%massa	0,5	0,23
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	3
Penetração retida, mín	%	55	68

Fonte: Autor, 2021.

Os resultados apresentados na Tabela 4 encontram-se dentro do especificado pela norma DNIT 095/2006 – EM que classifica os cimentos asfálticos de petróleo com embasamento na resolução nº19/2005 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Logo, o CAP 50/70 usado se enquadrrou dentro dos parâmetros requeridos por esta resolução, sendo possível garantir a sua qualidade.

Além disso foi realizado o cálculo do Índice de Susceptibilidade Térmica por meio da Equação 1.

$$IST = \frac{500 \text{ Log } (P) + 20 PA - 120 - 50}{\text{Log}(P) + PA} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

IST = Índice de Susceptibilidade Térmica;

PA = Ponto de Amolecimento do CAP; e

P = Penetração a 25° (dmm).

O IST do CAP utilizado foi de -1,5, estando dentro da especificação, visto que o intervalo recomendado pela DNIT 095/2006 – ME é de -1,5 a +0,7. O CAP ensaiado está apto a ser utilizado na pesquisa uma vez que está dentro da faixa recomendada por norma.

4.2.1.2 Agregados

Nessa seção são apresentados os ensaios de granulometria, massa específica dos agregados graúdos e miúdos, abrasão Los Angeles, índice de forma e absorção, utilizados para caracterização dos agregados seguindo os procedimentos referidos nas normas citadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Normas utilizadas para caracterização dos agregados

Ensaio	Metodologia
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT-ME 083/98
Massa específica dos agregados graúdos	DNIT-ME 081/98
Massa específica dos agregados miúdos	DNIT-ME 084/95
Abrasão “Los Angeles”	DNIT-ME 035/98
Absorção	DNIT-ME 081/98
Adesividade	DNIT-MR 078/94
Índice de forma	DNIT-ME 086/94

Fonte: Autor, 2021.

Os ensaios mencionados nesta tabela foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentação (LEP), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

4.2.1.2.1 *Análise granulométrica*

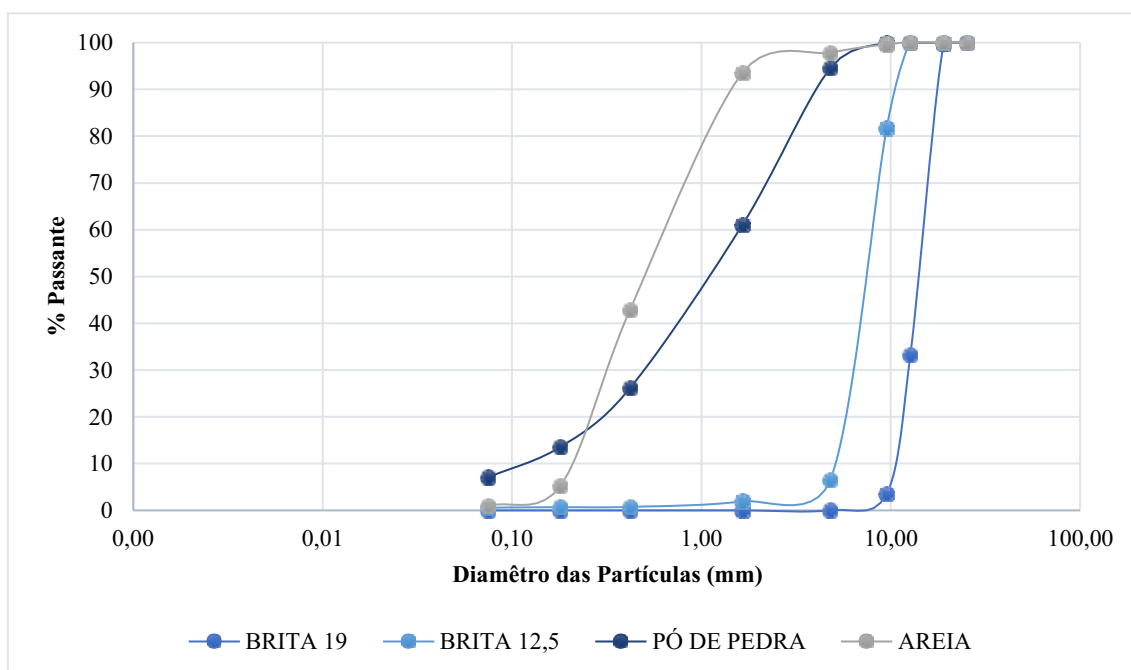
Na Tabela 6 estão relacionados os diâmetros das peneiras com as respectivas porcentagens passantes de cada agregado ensaiado. A determinação granulométrica foi realizada seguindo a norma DNIT-ME 083/98, as curvas granulométricas são apresentadas na Figura 16.

Tabela 6 - Porcentagem passante em massa (%)

Peneira (N)	Peneira (N)	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de Pedra
1 ½'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
¾'	19,0	99,60	100,00	100,00	100,00
½'	12,7	33,23	100,00	100,00	100,00
3/8'	9,5	3,57	81,76	99,65	100,00
Nº4	4,76	0,04	6,56	97,85	94,60
Nº10	2,0	0,04	1,97	93,53	61,09
Nº40	0,42	0,04	0,77	42,87	26,16
Nº80	0,18	0,03	0,73	5,24	13,58
Nº200	0,074	0,03	0,61	0,99	7,10

Fonte: Autor, 2021.

Figura 15 - Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Autor, 2021.

Na Figura 15 observa-se que a granulometria do pó de pedra e da areia são contínuas, sendo assim são materiais bem graduados. A granulometria das britas é mais uniforme, não contemplando uma grande variedade de partículas de diferentes dimensões, logo são materiais mal graduados.

4.2.1.2.2 *Massa específica e Absorção*

Nesta pesquisa os agregados graúdos foram ensaiados segundo a norma DNIT-ME 081/98 para determinação da massa específica e da absorção. Para determinação da massa específica e absorção dos agregados miúdos foram utilizados os métodos da norma DNIT-ME 084/95. Os resultados dos ensaios citados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de massa específica e absorção dos agregados

Agregado	Massa específica	Massa específica	Absorção
Graúdo	real (g/cm³)	aparente (g/cm³)	(%)
Brita 19mm	2,668	2,636	0,46
Brita 12,5mm	2,665	2,616	0,706
Pó de pedra	2,513	2,475	0,60
Areia	2,626	2,481	0,14

Fonte: Autor, 2021.

Esses dados de massa específica foram utilizados para determinação do teor ótimo de CAP para a dosagem SUPERPAVE.

4.2.1.2.3 *Equivalente areia*

De acordo com as especificações normativas DNIT 031/2006 – ES os agregados miúdos devem apresentar um valor mínimo para o equivalente areia de 55%. Na Tabela 8, estão expressos os valores obtidos ao ensaiar a areia e o pó de pedra.

Tabela 8 - Equivalente areia dos agregados

Ensaio	Requisito	Agregados miúdos	
Equivalente areia	Mín.	Areia	Pó de Pedra
(%)	55%	65,04	80,34

4.2.1.2.4 *Abrasão Los Angeles*

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado nos agregados graúdos de acordo com a norma do DNIT-ME 035/98. Na Tabela 9 estão expressos os desgastes dos agregados que

segundo as especificações da norma DNIT 031/2006 – ES que estabelece que o desgaste Los Angeles seja igual ou inferior a 50%.

Tabela 9 - Abrasão Los Angeles

Ensaio	Requisito	Agregados graúdos	
		Brita 19mm	Brita 12,5mm
Abrasão Los Angeles (%)	Mín.		
	50%	79,57%	79,57%

Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a Tabela 9, os agregados utilizados superaram o limite mínimo (50%) de abrasão Los Angeles requerido pela norma do DNIT-ME 035/98.

4.2.1.2.5 Índice de Forma

O ensaio de Índice de forma foi realizado nos agregados graúdos de acordo com a norma DNIT – ME 086/94. Na Tabela 10 estão expressos os índices de forma dos agregados ensaiados.

Tabela 10 - Índice de forma

Ensaio	Agregados graúdos	
	Brita 19mm	Brita 12,5mm
Índice de Forma	0,89	0,70

Fonte: Autor, 2021.

Os agregados atendem ao requisito da norma DNIT 031/2006 – ES que estabelece índice de forma superior a 0,5 como mínimo para que o agregado possa ser utilizado.

4.2.1.2.6 *Adesividade*

Na Tabela 11 está apresentado o resultado do ensaio de adesividade da amostra de CAP 50/70 para a Brita 19”. Esse ensaio foi realizado seguindo os procedimentos da norma DNIT – MR 078/94.

Tabela 11 – Adesividade

Ensaio	Amostra
	CAP 50/70
Adesividade	Não satisfatório

Fonte: Autor, 2021.

4.2.1.3 Cascalho de poços de perfuração

4.1.3.1 Massa específica e Análise granulométrica

A Tabela 12 apresenta o valor da massa específica real dos grãos para o resíduo oleoso.

Tabela 12 - Massa específica real dos grãos do resíduo oleoso

Ensaio	Amostra
	Resíduo Oleoso
Massa específica real (g/cm³)	2,342

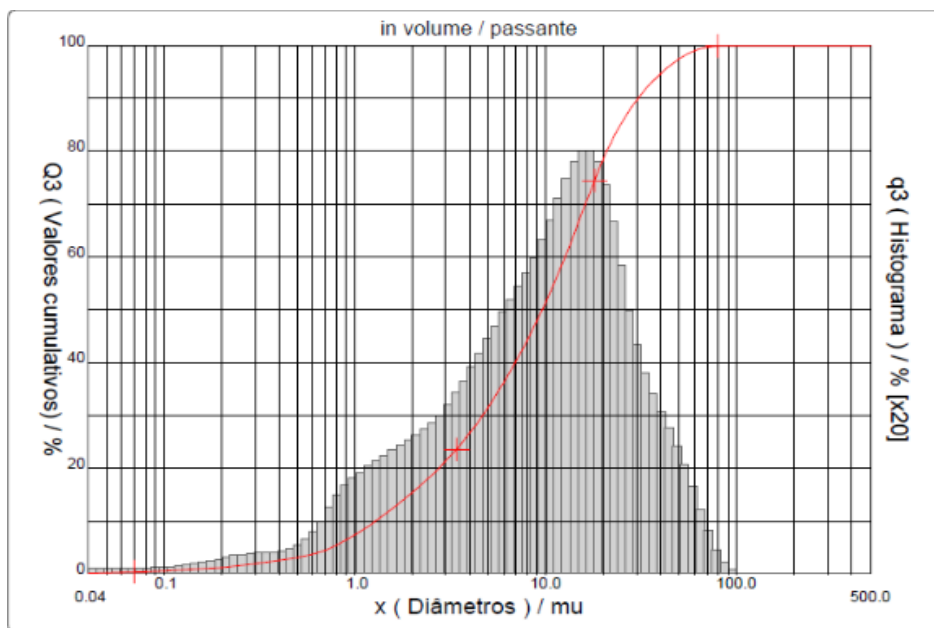
Fonte: Autor, 2021.

A análise granulométrica da distribuição dos tamanhos das partículas do resíduo oleoso foi obtida por meio do aparelho analisador de partículas por difração a laser. Nesse método é

utilizada a dispersão de partículas em fase líquida associada com um processo de medida óptica por meio de difração de laser.

A análise granulométrica é realizada por meio de uma combinação da relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho das partículas. O resultado desse ensaio é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Gráfico da distribuição granulométrica do resíduo oleoso obtida por difração à laser



Fonte: Autor, 2021.

A análise do cascalho de poços de perfuração indica que o mesmo possui granulometria aceitável para ser utilizado com filer.

4.3.1.3.2 Análise química e porcentagem de betume do cascalho de perfuração de poços de petróleo

Na Tabela 13 estão expostos os resultados obtidos a partir da análise química do cascalho. Os resultados evidenciam a presença majoritária de óxido de silício (58,43%), seguida de uma porcentagem considerável de óxido de alumínio (17,06%), óxido de ferro (7,01%), óxido de cálcio (5,73%), óxido de bário (3,26%) e baixos teores de óxidos de enxofre, magnésio, potássio e titânio). A composição química obtida para o resíduo oleoso classifica-o como sendo um complexo sílico aluminoso.

Segundo Lucena (2008) a elevada presença de óxido de silício, indica um material que apresenta afinidade com os materiais tradicionais (agregados graúdos e miúdos), possibilitando assim um menor desempenho na mistura asfáltica.

Tabela 13 - Composição química do resíduo oleoso de petróleo

Componente	Porcentagem (%)
SiO ₂ (óxido de silício)	58,43
Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	17,06
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	7,01
CaO (óxido de cálcio)	5,73
BaO (óxido de bário)	3,26
SO ₃ (óxido sulfúrico)	2,52
MgO (óxido magnésio)	2,23
K ₂ O (óxido de potássio)	1,82
TiO ₂ (dióxido de titânio)	1,60
Outros	0,27

Fonte: Autor, 2021.

Os resultados obtidos nessa pesquisa são similares aos obtidos em pesquisas (Sousa, 2017; Mota, 2018; Medeiros, 2010; Júnior, 2017) onde foram realizadas análises químicas do cascalho de perfuração de poços de petróleo como os resultados expostos na Tabela 2.

Quanto ao aspecto da toxicidade, o resíduo é classificado como tóxico, uma vez que o teor de óleo e graxas encontrado no mesmo é 5,4% ultrapassando o limite estabelecido pela norma que é de 5% em massa. Portanto, de acordo com as características apresentadas, o RO foi classificado como resíduo Classe I ou perigoso de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

4.3.1.3.3 Análise Térmica Diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG)

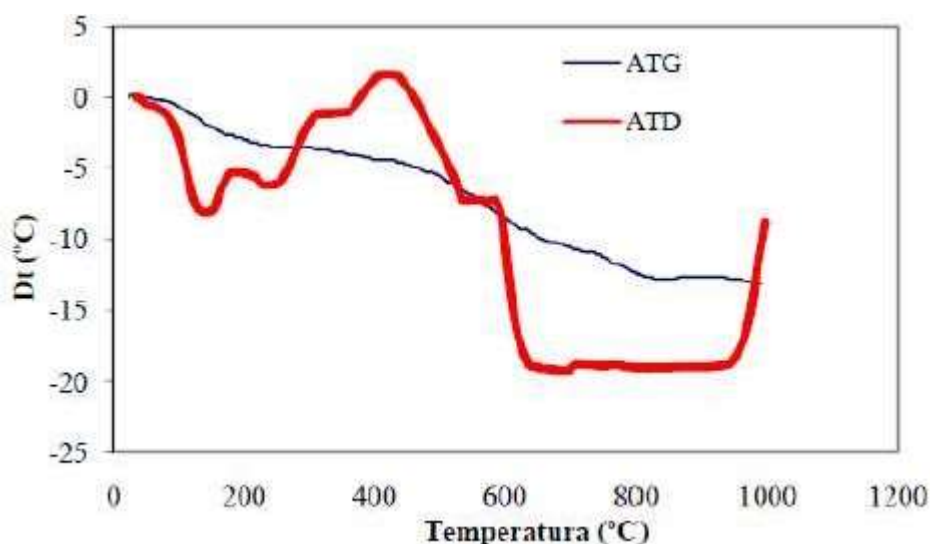
Com o objetivo de indicar as faixas de temperatura onde ocorrem as perdas de massa e as temperaturas em que ocorrem transformações endo e exotérmicas, as análises termogravimétrica e termodiferencial foram utilizadas, uma vez que essas são úteis na geração de curvas térmicas dos materiais.

A Figura 17 ilustra os resultados da ATD e ATG para o resíduo oleoso de petróleo. Na ATG ocorreu uma perda de massa de 3,75% entre 25°C e 225°C, e de 8,25% entre 300°C e 850°C. Totalizando uma perda de massa de 12%.

Ao analisar as curvas de ATD do resíduo oleoso de petróleo, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- 1) Em torno de 190° perda de água livre e adsorvida – pico endotérmico;
- 2) Em torno de 320° combustão da matéria orgânica – pico exotérmico;
- 3) Em torno de 412° transformação de quartzo alfa para quartzo beta – pico exotérmico.

Figura 17 - Análise Térmica Diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) do resíduo oleoso de petróleo



Fonte: Autor, 2021.

Nesta pesquisa a temperatura máxima de aquecimento do RO foi em torno de 177 °C, logo para fabricação das misturas asfálticas não foram atingidas as faixas de temperatura onde ocorrem as perdas de massa, assim como não são alcançadas as temperaturas em que ocorrem transformações endo e exotérmicas.

A utilização do RO em misturas asfálticas não exige restrições quanto a temperatura de usinagem e compactação, uma vez que, as mesmas são inferiores as faixas de temperaturas onde ocorrem as modificações da massa do resíduo oleoso.

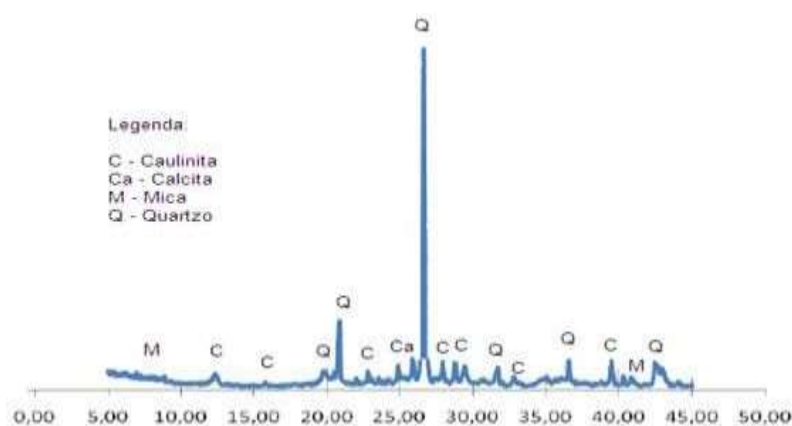
4.3.1.3.4 Difração de Raio – X (DRX)

O resíduo oleoso passou pela peneira nº200 (0,075 mm) e foi acondicionado em porta amostra de vidro para a análise por difração de raios-x. A Figura 18 apresenta o difratograma do resíduo oleoso, observa-se que as fases mineralógicas presentes no cascalho de perfuração são: quartzo, calcita, mica e caulinita.

Vale ressaltar que por ser essencialmente composto por quartzo, com pequenas quantidades de calcita, mica e caulinita o resíduo pode ser adicionado na mistura asfáltica sem que venha trazer prejuízo ao desempenho da mesma em relação a parâmetros de resistência e durabilidade, devido a afinidade entre esses elementos e os materiais tradicionais (brita, areia, pó de pedra).

A elevada quantidade de quartzo é condizente com o elevado teor de óxido de silício encontrado na análise química (58,43%). Em razão da elevada porcentagem de óxido de silício espera-se que o cascalho proporcione um maior ganho de resistência na mistura asfáltica quando comparada ao filer convencional.

Figura 18 - Difratograma do cascalho



Fonte: Autor, 2021.

4.3 Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas utilizadas nessa pesquisa foi realizada seguindo a metodologia SUPERPAVE (Figura 19), objetivando determinar o teor ótimo de cimento asfáltico de petróleo para mistura asfáltica estudada.

Figura 19 - Fluxograma da dosagem SUPERPAVE



Fonte: Autor, 2021.

Para a realização da primeira etapa da dosagem SUPERPAVE, utilizou-se a faixa C especificada pelo DNIT e levou-se em consideração os pontos de controle e zonas de restrição. Nessa etapa foram escolhidas três composições granulométricas a partir dos agregados disponíveis (brita 19mm, brita 12,5mm, pó de pedra, areia e filer), sendo assim, elaboradas três curvas Fuller, uma superior, uma intermediária e uma inferior.

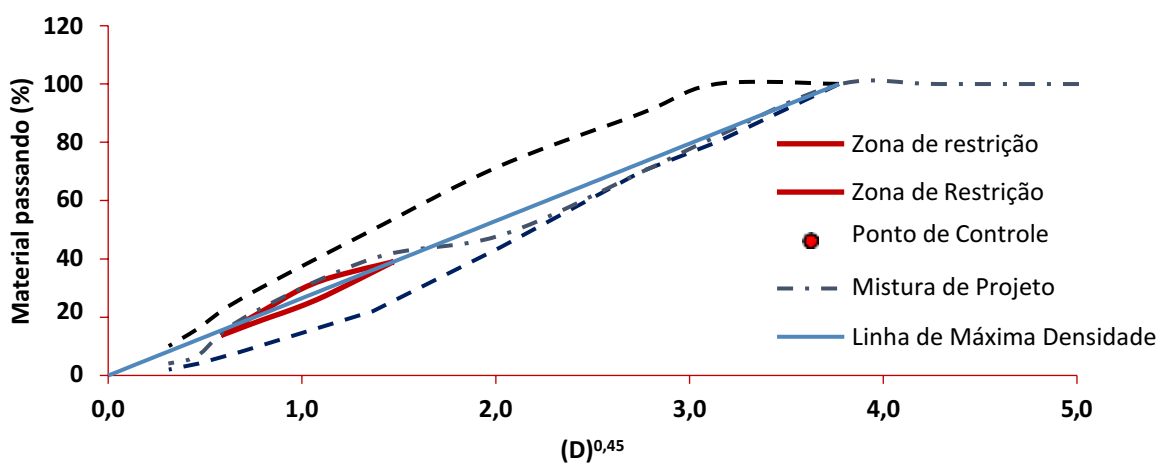
A seguir estão representadas as curvas Fuller: superior (Figura 20), intermediária (Figura 21), inferior (Figura 22). Como também a Tabela 14 com as proporções dos agregados utilizados nessa pesquisa.

Tabela 14 - Proporção dos agregados nas curvas granulométricas

Curva	Brita 19mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de pedra	Filer
Superior	12%	25%	21%	40%	2%
Intermediária	20%	25%	20%	33%	2%
Inferior	27%	22%	24%	25%	2%

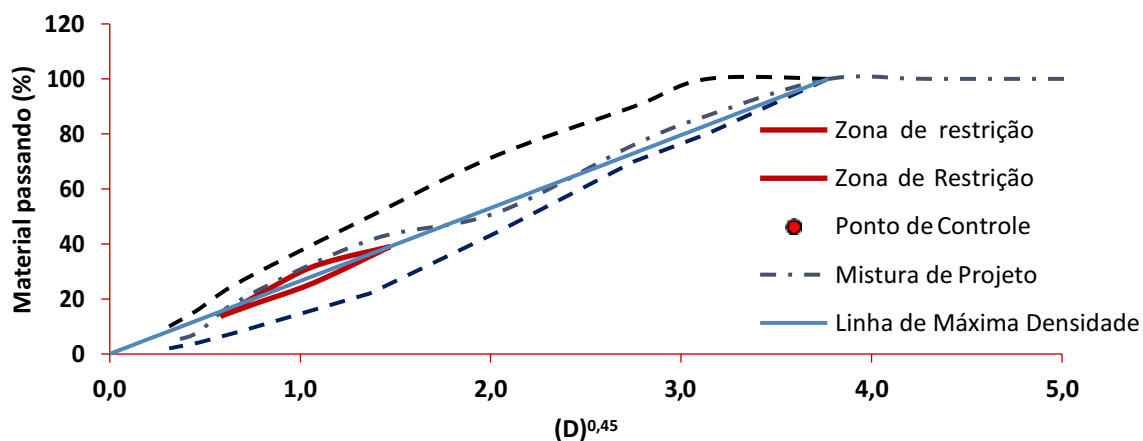
Fonte: Autor, 2021.

Figura 20 - Curva granulométrica inferior



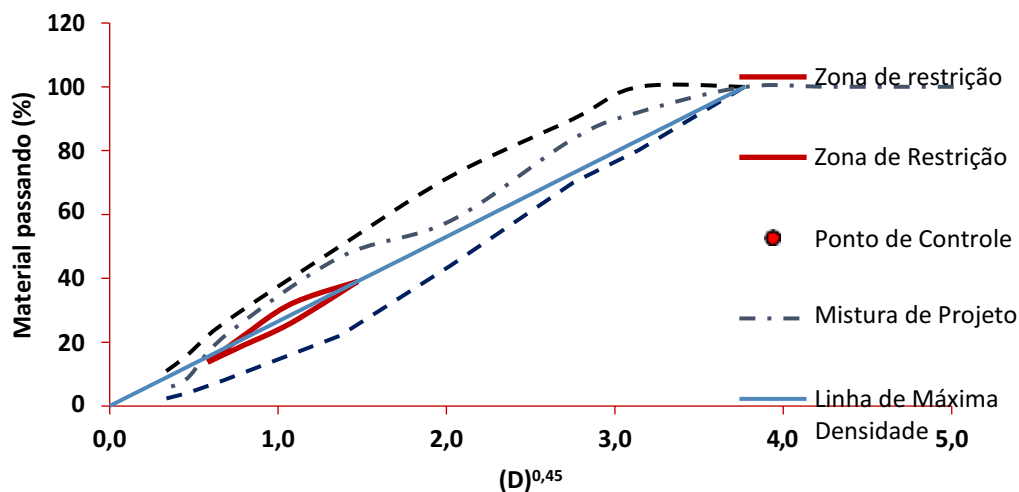
Fonte: Autor, 2021.

Figura 21 - Curva granulométrica intermediária



Fonte: Autor, 2021.

Figura 22 - Curva granulométrica superior



Fonte: Autor, 2021.

A segunda etapa consistiu-se na compactação de corpos de prova no compactador giratório SUPERPAVE (Figura 23), com um teor estimado para cada mistura. A metodologia SUPERPAVE objetiva que a quantidade de CAP utilizada deva ser tal qual a mistura atinja 4% de volume de vazios no número de giros de projeto. Nessa pesquisa com o teor inicial de CAP fixado em 5%, foi possível obter as propriedades volumétricas (V_v , VAM e RBV) para as misturas experimentais.

Figura 23 - Compactador SUPERPAVE



Fonte: Autor, 2021.

Além disso, foi realizado o método RICE TEST (desenvolvido por James Rice), para medida da densidade máxima medida, conhecida como Gmm, preconizada pela norma americana ASTM D2041.

Após esses procedimentos foi possível determinar a proporção pó/asfalto que, como observado na Figura 25, o fluxograma extraído de Bernucci (2010) corresponde a proporção/razão entre o material passante na peneira de nº200 e o teor de ligante, esse parâmetro deve estar entre 0,6 e 1,2. Por fim, a metodologia SUPERPAVE possibilita ao projetista a escolha, entre as três composições granulométricas, a que melhor atende às exigências volumétricas de projeto.

Tabela 15 - Propriedades volumétricas para o teor de 5%

Curvas	%Ligante	%Gmm	%Gmm	%Gmm	Vv	VAM
		Ninicial	Nprojeto	Nmáximo		
Superior	5%	88,92	93,76	94,39	6,24	19,30
Intermediária	5%	88,92	95,39	96,01	4,61	18,07
Inferior	5%	88,92	95,25	95,49	4,75	18,05
Limites		<89,0	96,00	<98,0	4,0	13 (mín)

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 15 é possível inferir que a curva intermediária foi a que proporcionou um volume de vazios mais próximo de 4%, no entanto esse valor ultrapassou em 0,61 do valor requerido para os padrões volumétricos.

Desse modo, na etapa final foi realizada a seleção do teor ótimo de cimento asfáltico de petróleo de projeto, por meio da confecção de dois corpos de prova com o teor de projeto de 5,0% e outros corpos-de-prova com teor estimado de $\pm 0,5$ e $+1\%$, sendo assim compactados no Nprojeto e determinadas suas propriedades volumétricas que estão a seguir na Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades volumétricas para cada teor de ligante estimado

Curvas	4,5 %	5%	5,5%	6,0%	Valores Normalizados
Vv (%)	6,34	4,61	3,38	2,29	4,0 %
VAM (%)	18,74	18,07	17,53	17,32	13,0 mín
Gmm (%)	93,66	95,39	95,39	97,71	96,0
RBV (%)	78,11	77,71	77,34	77,36	65 a 75%

Fonte: Autor, 2021.

A partir da Tabela 16, foi traçada uma curva volume de vazios x teor de ligante, uma vez que em nenhum dos teores ensaiados foi possível obter uma porcentagem de volumes de vazios de 4%, por meio da qual foi possível inferir que para ser confeccionado uma mistura asfáltica com 4% de volume de vazios seria necessário um teor de cimento asfáltico de petróleo de 5,3%.

Com isso, foram confeccionados dois corpos de prova com 100 giros ou N_p , no teor de 5,3% para verificação das propriedades volumétricas da mistura compactada e a partir desta ter a certeza que da obtenção dos 4% de volume de vazios requeridos pela metodologia SUPERPAVE.

Após a confecção dos dois corpos de prova com teor de CAP de 5,10% e a realização do Rice Test para o mesmo teor de CAP, foi possível determinar as propriedades volumétrica dos mesmos. Na Tabela 17 estão expostos os resultados obtidos.

Tabela 17 - Propriedades volumétricas para o teor de CAP de 5,10%

Curvas	5,3 %	Valores Normalizados
Vv (%)	4,2	4,0 %
VAM (%)	18,03	13,0 mín
Gmm (%)	95,75	96,0
RBV (%)	77,75	65 a 75%

Fonte: Autor, 2021.

Foi encontrado um teor de projeto de 5,3% de cimento asfáltico de petróleo, com um volume de vazios próximo ao estabelecido por norma (4,2 %). Com isso, o teor de projeto estabelecido foi de 5,3%. Assim, obtido o teor de projeto seguiu-se com a fabricação de corpos de prova que serão analisados mecanicamente.

4.3.1 Determinação da temperatura de usinagem e compactação

O ensaio de viscosidade rotacional permitiu a obtenção das temperaturas de usinagem e compactação da mistura utilizada. Parâmetros obtidos a partir do gráfico que correlaciona por meio de uma curva logarítmica a viscosidade versus a temperatura (°C).

As temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica, segundo Bernucci (2010) devem ser escolhidas a partir da curva de viscosidade-temperatura do cimento asfáltico de petróleo escolhido, tal qual a temperatura do CAP no momento da mistura corresponda a uma viscosidade que esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF ou $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, não devendo ser inferior a 107°C e nem superior a 177°C. Já os agregados devem estar em uma temperatura entre 10°C e 15°C acima da temperatura do ligante, não devendo ultrapassar 177°C.

Na Tabela 18 estão apresentadas as temperaturas de usinagem e compactação, obtidas a partir da caracterização do CAP puro, no ensaio de viscosidade rotacional. Com isso, o cimento asfáltico de petróleo foi aquecido a 157°C e os agregados foram aquecidos a 172°C, de acordo

com os critérios mencionados acima. A partir do ensaio de viscosidade foi determinada uma temperatura de compactação de 143°C.

Tabela 18 - Temperaturas de usinagem e compactação

Temperaturas em °C	
Temperatura do ligante	157
Temperatura dos agregados	172
Temperatura de compactação	143

Fonte: Autor, 2021.

4.4 Procedimentos experimentais

Essa pesquisa foi dividida em duas etapas, sendo elas: I) estudo reológico do mástico asfáltico com os fileres (cal, cascalho e uma combinação de ambos); II) análise das propriedades mecânicas das misturas asfálticas com adição de filer (cal, cascalho e uma combinação de ambos).

4.4.1 Primeira etapa

Para realização da primeira etapa (análise reológica) foram preparadas as seguintes amostras experimentais: CAP 50/70, CAP 50/70 + 2% de cal, CAP 50/70 + 1% de cal + 1% de RO e CAP 50/70 + 2% de RO. Os mastiques asfálticos foram confeccionados usando o agitador mecânico (Figura 24) produzido pela SoloTest.

Figura 24 - Agitador mecânico

Fonte: Autor, 2021.

4.4.2 Segunda etapa

Na etapa seguinte foram moldados corpos de prova nos teores de filler: 0% de cascalho + 2% de cal, 1% de cascalho + 1% de cal e com 2% de cascalho para análise das propriedades mecânicas da mistura que foi selecionada com base na metodologia SUPERPAVE anteriormente descrita. Com isso, foram realizados os ensaios de resistência a tração por compressão diametral, Flow Number, módulo de resiliência, módulo dinâmico e resistência ao dano por umidade induzida (Lottman modificado).

4.4.3 Etapa I - Caracterização reológica

4.4.3.1 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional é correntemente utilizado pelas normas brasileiras para classificar os ligantes asfálticos, apesar de fazer parte da metodologia SUPERPAVE e ser classificado como ensaio reológico. Seu destaque se deve ao fato de permitir identificar propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e estocagem. (FILHO, 2017) Sendo normatizado pela norma ABNT NBR 15184:2007.

Seguindo as orientações da norma, o CAP é colocado dentro de uma cubeta que recebe um cilindro com ranhuras padronizadas (spindle), ligado a uma haste que efetua torques. A viscosidade é medida por meio do torque necessário para girar esta haste que é realizado sobre as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°, a 20, 50 e 100 rpm, respectivamente. O equipamento utilizado foi o viscosímetro da marca Brookfield (Figura 25), modelo DV-III ULTRA, ligado a um controlador de temperatura Thermosel.

Figura 25 - Viscosímetro Brookfield



Fonte: Autor, 2021.

4.4.3.2 Grau de desempenho – PG

O grau de desempenho (PG) foi realizado em amostras confeccionadas com 25 mm de diâmetro e 1mm de espessura, de cimento asfáltico de petróleo puro e mástique asfáltico, sendo realizado antes e após envelhecimento em estufa a curto prazo (RTFO).

A determinação do PG é preconizada pela norma ASTM D 6373-16 e consiste em determinar a temperatura correspondente ao valor do parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ superior a 1,0 kPa para o CAP sem envelhecimento e superior a 2,2 kPa após o processo de envelhecimento em RTFO.

O procedimento para realização do ensaio constituiu-se na variação de temperatura partindo de 46°C com degraus de 6°C, determinando para cada intervalo o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$. O ensaio foi finalizado ao atingir valores inferiores aos limites impostos pela norma para o

parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$. O equipamento utilizado foi um reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Reômetro de cisalhamento direto (DSR)



Fonte: Autor, 2021.

Por meio deste ensaio é possível analisar, também, o índice de envelhecimento (AI) nas amostras envelhecidas a curto prazo em RTFO por meio do parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ como avaliação do comportamento do ligante, possibilitando mostrar a susceptibilidade do material ao envelhecimento (Azahar et al., 2016). O índice AI pode ser obtido pela Equação 1:

$$AI = \frac{G^*/\text{sen}\delta(\text{pós-RTFO})}{G^*/\text{sen}\delta(\text{antes RTFO})} \quad \text{Equação 1}$$

4.4.3.3 Fluência e recuperação sob tensões múltiplas - MSCR

O ensaio é preconizado pela norma ASTM D7405-15. Para a sua realização foram confeccionadas amostras com 25mm de diâmetro e 1mm de altura do CAP puro e dos mastiques

asfálticos, envelhecidas após RTFO. As temperaturas utilizadas no ensaio foram obtidas por meio do ensaio de PG.

A realização do ensaio consiste na aplicação de ciclos de carregamentos, cada ciclo consiste em um período de carregamento de fluência de 1 segundo, seguido por um período de relaxamento de 1 segundo. Foram aplicados 20 ciclos consecutivos de carregamento, sendo 10 ciclos para tensão baixa (100 Pa) e 10 ciclos para tensão alta (3200 Pa). A partir da realização desses procedimentos foi possível obter parâmetros de compliância não-recuperável – J_{nr} e porcentagem de recuperação – R (%). O equipamento utilizado foi um reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer.

4.4.3.4 Varredura de amplitude de deformação – LAS

A metodologia para realização do ensaio LAS é apresentada pela norma American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) TP 101 – 14, onde amostras do CAP puro e dos mastiques asfálticos foram confeccionadas com 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura e envelhecidas em RTFO. De acordo com as orientações normativas este envelhecimento deve ser realizado em PAV (Vaso de pressão de envelhecimento) à temperatura de 25 °C, porém devido as limitações laboratoriais, o ensaio foi realizado apenas para amostras envelhecidas em RTFO.

O procedimento é composto de duas fases. Na primeira fase é realizada uma varredura de frequência, por meio da qual a amostra foi submetida a um carregamento de cisalhamento com frequência entre 0,2 e 30 Hz com amplitude de deformação de 0,1%. Na segunda fase ocorre uma varredura de amplitude de deformação objetivando mensurar o dano sofrido pela amostra, para isso é aplicada uma carga com frequência de 10 Hz e com um nível de amplitude variando de 0,1 a 30%. O equipamento utilizado foi um reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer.

4.4.4 Etapa II – Caracterização mecânica

4.4.4.1 Resistência a tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, ou RT, foi realizado seguindo os procedimentos normativos constantes nas normas DNIT - ME 136/18 ou ABNT NBR

15.087/12. A norma prescreve que por meio do ensaio de compressão diametral com carregamento estático crescente até a ruptura determina-se a resistência a tração indireta de um corpo de prova (Cp) cilíndrico de mistura asfáltica representada pela tensão máxima que este corpo é capaz de suportar até a sua ruptura.

Os procedimentos dos ensaios foram os seguintes:

- Obteve-se a média de altura (H) e diâmetro (D) dos CP's;
- Controlou-se a temperatura em $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$, por um período de 4h;
- Colocou-se o corpo de prova em um dispositivo centralizador;
- Posicionar o dispositivo centralizador na prensa;
- Aplicar progressivamente, a carga vertical de compressão, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1 \text{ mm/s}$, até que se dê a ruptura completa.
- A RT foi calculada com o valor da carga de ruptura (F) obtido, por meio da Equação 2.

$$\sigma = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

σ = resistência à tração, a temperatura do ensaio, em MPa;

F= carga de ruptura, em N;

D= diâmetro de corpo de prova, em mm;

H=altura do corpo prova (espessura), em mm.

4.4.4.2 Módulo de resiliência

O ensaio de Módulo de resiliência foi realizado segundo as resoluções normativas da ABNT NBR 16018/2011, sendo obtido o deslocamento resiliente instantâneo.

Os ensaios para determinação do módulo de resiliência foram realizados na prensa hidráulica UTM-25 da IPC.

Nas subseções seguintes são descritos os procedimentos a serem realizados no ensaio de módulo de resiliência:

- Determinar a RT, em pelo menos 3 corpos de prova de mesmas características da amostra descrita e determinar a carga do ensaio como sendo 10 % da RT média obtida;
- Determinar a geometria (altura e diâmetro) dos corpos de prova;

- Condicionar por um mínimo de 4h, a temperatura de ensaio, geralmente de $25\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$;
- Alinhar e centralizar o corpo de prova verticalmente entre os frisos de carga, com os sensores de deslocamento posicionados;
- Condicionar o corpo de prova, aplicando 50 ciclos de carga;
- Aplicar a carga com uma frequência de 60 ciclos por minuto (1Hz), com um tempo de aplicação de 0,10 s e período de repouso com duração de 0,90 s.

A medição dos deslocamentos diametrais recuperáveis na direção correspondente à tensão gerada deve ser realizada por dois Linear Variable Differential Transformer (LVDT), posicionados no eixo horizontal.

4.4.4.3 Resistência ao dano por umidade induzida – Lottman Modificado

O ensaio de Lottman modificado foi realizado segundo a norma AASTHO T 283/14 com o objetivo de verificar os efeitos da saturação e condicionamento acelerado à água, em ciclos de gelo/degelo, de misturas asfálticas. Os procedimentos para realização do ensaio foram descritos a seguir:

Foram moldados 6 corpos de prova, com volume de vazios entre $7 \pm 1\%$, para cada um dos teores de filler: 2% de cal, 1% de RO + 1% de CAL e 2% de RO.

Os CP's foram separados em dois grupos (condicionado e não condicionado), os condicionados foram submetidos a uma pressão de vácuo residual de 250-650mmHg (Figura 27), de maneira a obter saturação entre 70 e 80% de água e posteriormente, colocados em um involucro plástico seguido da inserção de 10 ml de água destilada e vedação do involucro. Os CP's condicionados foram submetidos a um ciclo de congelamento de -18°C por um período de 16h, após esse procedimento foi realizado um ciclo de aquecimento em banho maria a 60°C por um período de $24\text{h} \pm 1\text{°C}$.

Figura 27 - CP's submetidos a pressão de vácuo



Fonte: Autor, 2021.

Após o aquecimento, os cp's condicionados foram resfriados em banho maria de 25°C por um período de 2±1 h para estabilização da temperatura. E os CP's não condicionados foram vedados em invólucros plásticos e submetido ao banho maria para estabilização da temperatura. Logo após a estabilização da temperatura, no CP's condicionados (RTc) e não-condicionados (RTnc), foi realizado o ensaio de RT.

Os índices numéricos resultantes das propriedades de tração indireta são obtidos com a comparação das propriedades dos cp's submetidos à umidade e condições de gelo/degelo, com outros corpos de prova testados a seco, sendo assim, a resistência a tração retida por umidade induzida (RRT), é a razão entre RTc e TRnc com valores expressos em porcentagem.

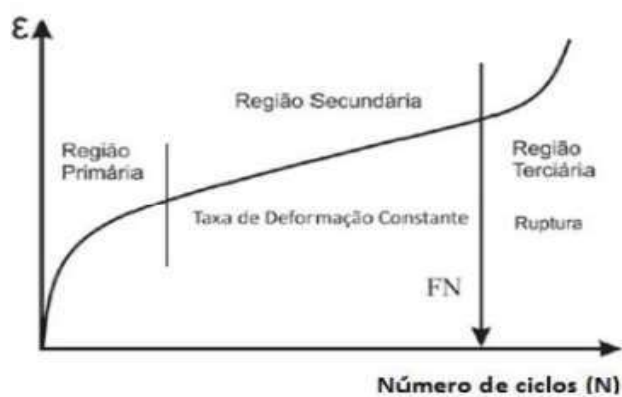
De acordo com a AASHTO T283/14 o critério de definição de suscetibilidade a umidade de uma mistura asfáltica é de $RRT \geq 70\%$. Para o método SUPERPAVE o critério é de $RRT \geq 80\%$.

4.4.4.4 Flow Number

O ensaio de Flow Number permite simular de forma mais eficiente as ações do tráfego, como as passadas de veículos repetidamente sobre a estrutura do pavimento. Este ensaio objetiva determinar o número de ciclos de carga o qual o pavimento pode resistir até que ocorra a fluência.

A partir da realização deste ensaio obtém-se um gráfico que correlaciona a deformação permanente com o número de ciclos aplicados. Segundo Costa (2018) com estes resultados é possível gerar uma curva e subdividi-la em três fases de deformação: Fase 1 (côncava para baixo), fase 2 (aproximadamente reta) e fase 3 (côncava para cima) como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Subdivisões da curva oriunda do ensaio de Flow Number



Fonte: Costa, 2017.

Na região primária, ocorre a uma taxa elevada, a densificação da mistura com alteração da microestrutura e reorientação das partículas do agregado, fato que conduz a uma mistura mais resistente. O comportamento do cp's (Figura 29) durante essa fase é predominantemente elástico. Ao passar para região secundária, a deformação cresce a uma taxa praticamente constante e a inclinação da curva nesta fase pode ser utilizada para avaliar a susceptibilidade à deformação permanente das misturas betuminosas. Na região terciária a deformação cresce de maneira exponencial e corresponde a fase de ruptura do cp, que apresentará comportamento plástico. Sendo assim, Flow Number é definido como o número de ciclos necessários para que ocorra a transição entre as zonas secundárias e terciárias.

Figura 29 - Corpos de prova do ensaio de Flow Number

Fonte: Autor, 2021.

Na Tabela 27, estão expressos os critérios de FN requeridos para diferentes níveis de tráfego da literatura e pela NCHRP 09 – 33, dados por equivalente de carga por eixo padrão.

Tabela 19 - Critérios de FN

Pesquisas/ Níveis de Tráfego (número N)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
				3×10^6	$[3 \times 10^6; 1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7; 3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
Nascimento (2008)	6,5 a 7,5	60	204	-	300	750	-
AAT (2011)	4,7 a 8,2	31,3 a 54,3	600		53	190	740
Bonaquist (2012)	6,0 a 7,3	49,6	600	15	50	135	415
NCHRP 09-33	-	-	-	-	53	190	740

Fonte: Adaptado de Bastos, 2017.

O ensaio de Flow Number foi realizado seguindo as especificações técnicas da norma ABNT NBR 16505/2016. A sua execução ocorreu seguindo os seguintes procedimentos: Os cp's foram colocados na Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) a uma temperatura de 60° C, em seguida foram submetidos a ciclos de carga uniaxial de compressão de 200KPa, sendo aplicados em corpos de prova de 150mm de altura e 100mm de diâmetro, utilizando a dosagem SUPERPAVE com volume de vazios de $7 \pm 0,5$ e 28 giros no compactador.

Cada carregamento aplicado tem duração de 0,10 segundo e intervalo de 0,90 segundo entre as aplicações de carga. O critério de parada para o ensaio o alcance de 10000 ciclos ou uma deformação de 50000 microstrais, ao atingir uma das duas deformações o ensaio é encerrado.

4.4.4.5 Módulo Dinâmico

O ensaio de módulo dinâmico consiste na aplicação de uma carga uniaxial compressiva senoidal em um corpo de prova cilíndrico em diferentes faixas de temperaturas e de frequências de carregamento com o objetivo de caracterizar a rigidez e as propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas. (PORTO, 2018) Os resultados oriundos do ensaio de MD são interpretados a partir da construção de curvas mestras, as quais permitem comparações para uma faixa de temperatura e frequências.

A realização do ensaio de módulo dinâmico seguiu as especificações da norma AASTHO TP 79/16. Com isso, seguiu-se os seguintes procedimentos experimentais: foram moldados 9 cp's (Figura 30) com 150mm de altura e 100mm de diâmetro, em temperaturas e frequências estabelecidas em norma. Os mesmos foram ensaiados nas temperaturas de 4,4°C, 21,1°C e 37,8° C com frequências de 0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz e carregamentos fixos, sendo 1400, 700 e 200 KPa os carregamentos escolhidos. Objetivando, com isso, a confecção das curvas mestras das misturas asfálticas ensaiadas. O equipamento utilizado foi a AMPT.

Figura 30 - Corpos de prova do ensaio de MD

Fonte: Autor, 2021.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios reológicos para o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70, CAP 50/70 com adição de 2% de cal e CAP 50/70 com adição de 1% de cal e 1% de RO. Com base nos resultados e especificações normativas, a partir de cada ensaio, foram destacados e apresentados os resultados obtidos, a fim de entender o comportamento do mástico asfáltico e como ele pode vir a influenciar nas propriedades mecânicas das misturas estudadas.

Em sequência, foram mostrados os resultados referentes a caracterização mecânica das misturas asfálticas com os mesmos teores de filer utilizados na caracterização reológica. Para cada ensaio mecânico realizado, foram discutidos o enquadramento/ou não nos parâmetros exigidos em norma.

5.1 Perda de Massa

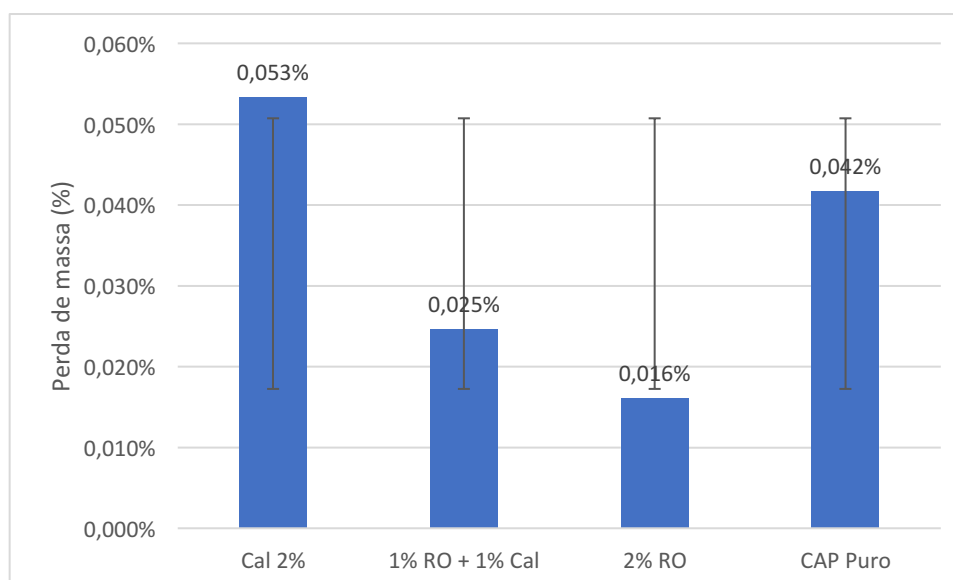
Na Tabela 19 e na Figura 31 estão apresentados os resultados de perda de massa dos mastiques asfálticos e do CAP puro após o procedimento de envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO. Segundo Porto (2018), a perda de massa indica a capacidade de envelhecimento do cimento asfáltico de petróleo.

Tabela 20 - Perda de massa

Perda de massa (%)				
	CAP PURO	2% CAL	1% RO + 1% CAL	2% RO
Amostras	0,042	0,053	0,025	0,016

Fonte: Autor, 2021.

Figura 31 - Perda de massa



Fonte: Autor, 2021.

Segundo Dehouche et al., (2012), o envelhecimento dos ligantes asfálticos ocorrem normalmente devido as reações de oxidação e volatilização. Cravo (2016) explica que a perda de massa do CAP é o resultado de quanto o material sofreu o efeito da ação do calor e do ar aplicados no processo, ao ponto de causar a degradação e redução da matéria presente, e que subentende em alterações na composição e nas propriedades reológicas do material, como o aumento de sua viscosidade e rigidez.

Os valores obtidos estão de acordo com os limites indicados pela norma DNIT- ME 095/2006 para o CAP 50/70, que impõe variações de perda massa inferiores a 0,5%. Foi

observado que os mástique asfálticos com a presença do resíduo de cascalho (RC), teve uma menor perda de massa no processo de envelhecimento.

Filho (2017) afirma que a redução da perda de massa do CAP significa dizer que este volatilizou menos seus componentes, e que perdeu menos propriedades viscoelásticas e provavelmente poderá resistir mais ao enrijecimento na medida em que envelhece, provocando uma maior durabilidade a deformações permanentes e à fadiga do pavimento. Dessa maneira, os resultados indicaram que a adição do resíduo de cascalho proporcionou uma menor perda de massa.

5.2 Viscosidade Rotacional

Os resultados do ensaio de viscosidade rotacional, com CAP puro e os mástiques com os teores e tipos de filer estudados, estão apresentados na Tabela 20 (viscosidade antes do RTFO) e 21 (viscosidade após RTFO) e nos gráficos da Figura 32.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do RTFO

Viscosidade Rotacional (cP)				
	CAP PURO	2% CAL	1% RO + 1% CAL	2% RO
135° C	422,5	1271,25	1321	751,25
142° C	301,43	880,72	902,14	523,58
150° C	205	601,5	615	351,5
165° C	116	315,67	323,34	180,33
177° C	76,5	202,25	204,25	112

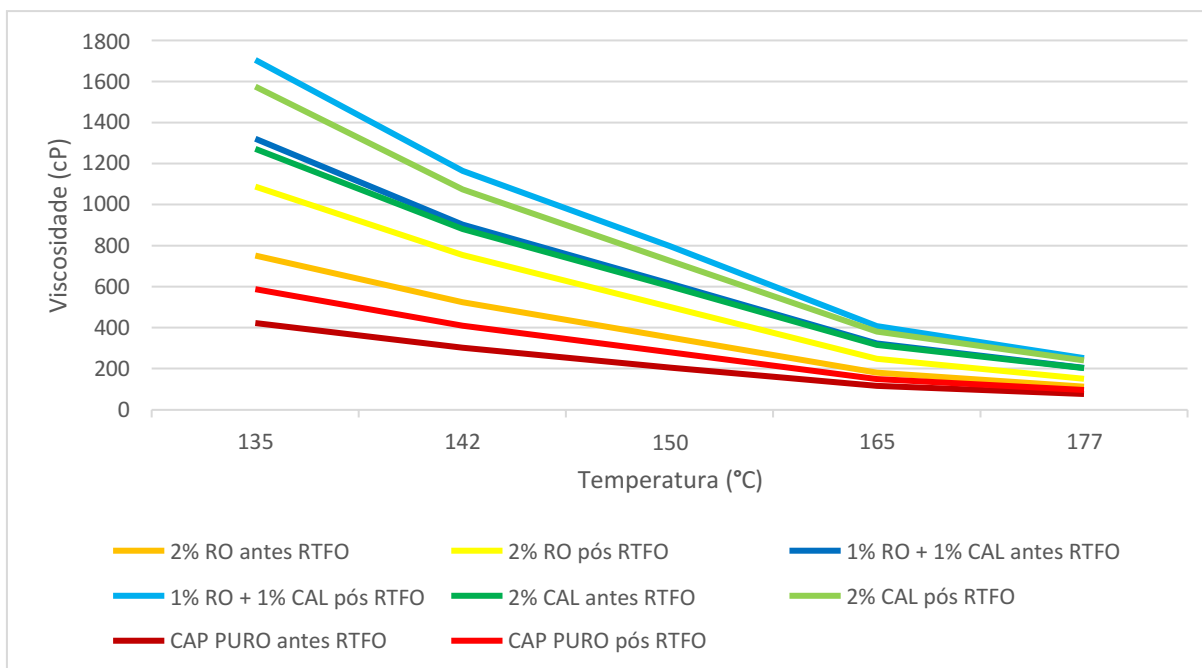
Fonte: Autor, 2021.

Tabela 22 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional após RTFO

Viscosidade Rotacional (cP)				
	CAP PURO	2% CAL	1% RO + 1% CAL	2% RO
135° C	587,5	1575	1705	1087,5
142° C	409,29	1074,29	1164,29	753,58
150° C	280	726	797,5	501,5
165° C	149,67	381,33	408,34	249
177° C	96	240,75	251,75	151

Fonte: Autor, 2021.

Figura 32 - Viscosidade rotacional



Fonte: Autor, 2021.

A partir da Figura 32 é possível observar que o CAP puro possui a menor viscosidade, dentre as apresentadas tanto antes quanto após RTFO. Isso indica que o mesmo é um material

com alta fluidez. A adição de filer ao mesmo altera esse comportamento, tornando-o menos fluido. Podemos verificar que os mastiques asfálticos com adição de cal apresentaram a menor fluidez com ênfase na composição 2% de cal e na junção de 1% de cal + 1% de RO, sendo está a que apresentou a maior viscosidade dentre as estudadas.

Na Figura 32 observa-se que todos os mastiques antes do procedimento de envelhecimento a curto prazo atingiram maiores teores de fluidez do que após realização deste procedimento, indicando que ao ser submetido a esse processo de envelhecimento o mástico torna-se mais rígido, levando ao aumento da sua viscosidade.

No estudo proposto por Lucena (2008) observou incrementos de viscosidade, porém utilizando viscosímetro Saybolt Furol, análogos a esses, ao adicionar a cal e o resíduo oleoso, formando o mástico asfáltico. Em sua pesquisa conclui que o filer resíduo apresenta um comportamento mediano em comparação aos fileres cal e cimento Portland, afirmando então, que esse bom comportamento do filer resíduo indica que existe uma interação benéfica entre ele e o CAP.

Esses incrementos de viscosidade devem ser bem monitorados, uma vez que o aumento excessivo da viscosidade dos mastiques pode vir a ser um problema para as misturas asfálticas, pois segundo Oliveira (2015) apesar de a utilização de mástico muito rígido ser aconselhável para determinados tipos de pavimentos e situações, o excesso desta leva a mistura a se tornar altamente frágil e quebradiça, o que resulta em um mau desempenho dos pavimentos a baixas temperaturas.

Em contrapartida, a importância da viscosidade para compactação se dá em obter uma mistura asfáltica que não sofra o escorregamento quando compactada pela ação dos rolos compactadores. (GAMA, 2016) Uma vez que viscosidades muito baixas podem provocar o escoamento do CAP e consequente escorregamento da mistura asfáltica.

A metodologia SUPERPAVE indica um valor de viscosidade ideal para as misturas asfálticas, no qual, permite que o cimento asfáltico de petróleo seja capaz de envolver todos os agregados. Diante do exposto, é necessário definir as Temperaturas de Usinagem – TU e Temperaturas de Compactação – TC obtidas por meio do ensaio de viscosidade rotacional.

Os valores das TU's e TC's são apresentados na Tabela 18, os mesmos foram calculados baseando-se na metodologia tradicional da ASTM D2493, que estabelece a temperatura (TU)

adequada para a usinagem a que cimento asfáltico de petróleo apresente viscosidade rotacional Brookfield de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e temperatura de compactação (TC) a que apresenta viscosidade rotacional Brookfield de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s.

Tabela 23 - Temperaturas de usinagem e compactação

Temperaturas de usinagem e compactação						
	Usinagem °C			Compactação °C		
	Intervalo	Valor Médio		Intervalo	Valor Médio	
CAP PURO	163	158	161	151	143	147
2% CAL	170	167	168	163	159	161
1% RO + 1% CAL	175	173	174	171	168	169
2% RO	175	173	174	170	168	169

Fonte: Autor, 2021.

A norma DNIT-ME 385/99 estabelece que, a temperatura de aquecimento deve ser de 150°C acrescida de 3°C para cada 1% de polímero e a temperatura máxima não deve exceder 180°C, para ligantes modificados com polímero. Porém, apesar de essa resolução não ser específica para o material incorporado no ligante, o RO, optou-se por toma-la como base para comparação dos resultados. Dessa forma, na Tabela 18 é possível constatar que os valores foram inferiores a temperatura máxima sugerida.

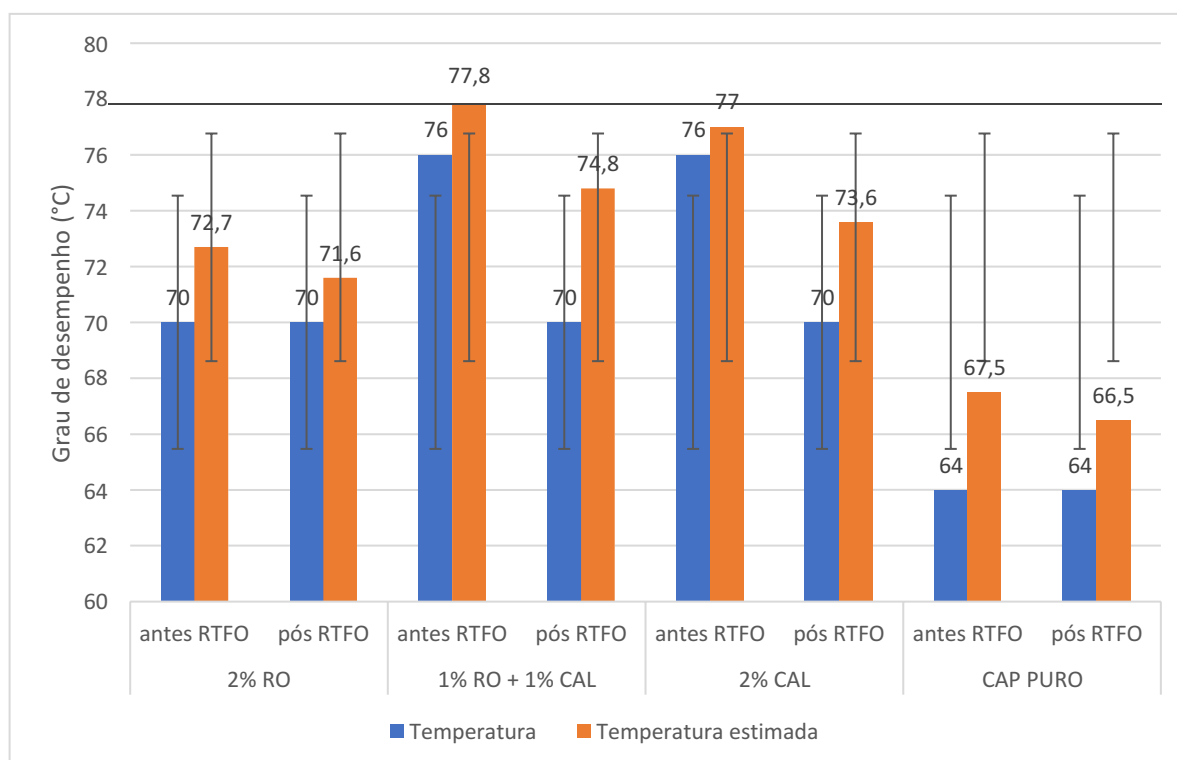
5.3 Grau de desempenho (PG)

Nesse tópico serão apresentados os valores de grau de desempenho para o CAP puro (referência) e o CAP modificado com adição de 2% de cal, 1% de RO + 1% de cal e 2% de RO para serem comparados.

Na Figura 33, estão expostos os resultados referentes ao ensaio de PG do cimento asfáltico de petróleo e dos mastiques asfálticos estudados. Nesse tópico também é apresentado

as temperaturas estimadas de falha dos ligantes, que conforme indicações da especificação SUPERPAVE, é definida como a temperatura na qual o parâmetro $G^*/\sin \delta$ atinge um valor menor de 1,0 kPa antes do processo de envelhecimento a curto prazo e um valor de 2,2 kPa após esse processo.

Figura 33 - Resultados do PG do CAP puro e com incorporação de teores de filer



Fonte: Autor, 2021.

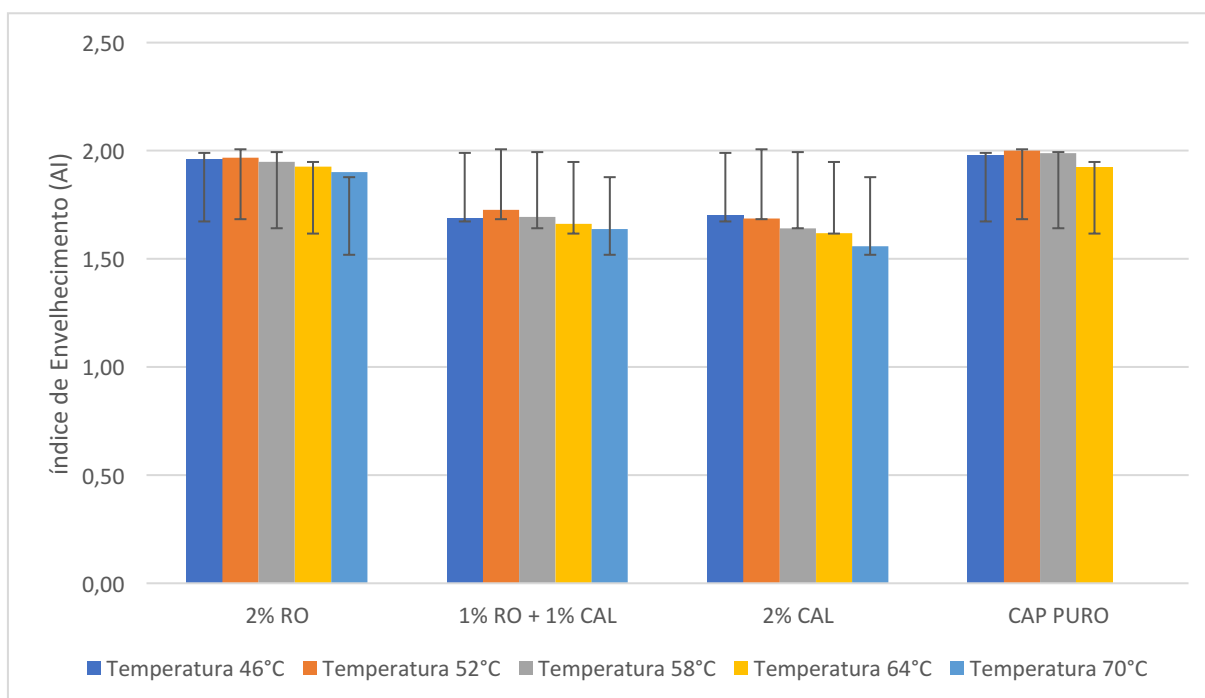
Os resultados expostos na Figura 33, mostraram que a adição de filer para formação dos mastiques asfálticos, aumentou a temperatura de PG em relação ao ligante puro. De acordo com a Figura 33, observou-se que o aumento foi acentuado na presença da cal, e um pouco mais evidente quando houve a combinação de 1% de cal com 1% de RO, porém a diferença deste para o grau de desempenho em comparação ao mastique com adição de 2% de cal não foi significativa.

Outro ponto a ser observado, é o PG após o processo de RTFO. Nesta análise é possível observar que o processo de envelhecimento a curto prazo diminuiu em maior escala as temperaturas de PG dos mástiques que utilizaram a cal como filer, porém, esses resultados ainda se igualam ou superam os valores obtidos com o CAP puro e o mástique asfalto formado com adição de 2% de RO.

Bardini et.al (2012) afirmou que o comportamento do mastique asfáltico depende da interação físico-química entre o filer e o cimento asfáltico de petróleo, observando que o efeito enrijecedor da cal hidratada pode ser atribuído à forma das partículas e a textura superficial da cal, que apresenta um grande potencial de atividade com o CAP.

Na Figura 34 estão apresentados os valores de índice de envelhecimento (aging index – AI) obtidos a partir da relação entre os parâmetros $G^*/\text{sen}\delta$ dos ligantes antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo pela estufa RTFO, conferindo o resultado para todas as temperaturas realizadas no ensaio que o cimento asfáltico de petróleo apresentou resistência superior a requerida.

Figura 34 - Índice de envelhecimento



Fonte: Autor, 2021

A adição de cal, resíduo oleoso e uma combinação de ambos foi benéfica, uma vez que diminuiu o IA o que indica uma menor oxidação e volatilização dos componentes químicos dos mastiques asfálticos. Sendo destaque os mastiques asfálticos com a adição de cal como filer, uma vez que apresentaram menores valores de AI quando comparados com o CAP puro, valores que se relacionam com a perda de massa após o RTFO.

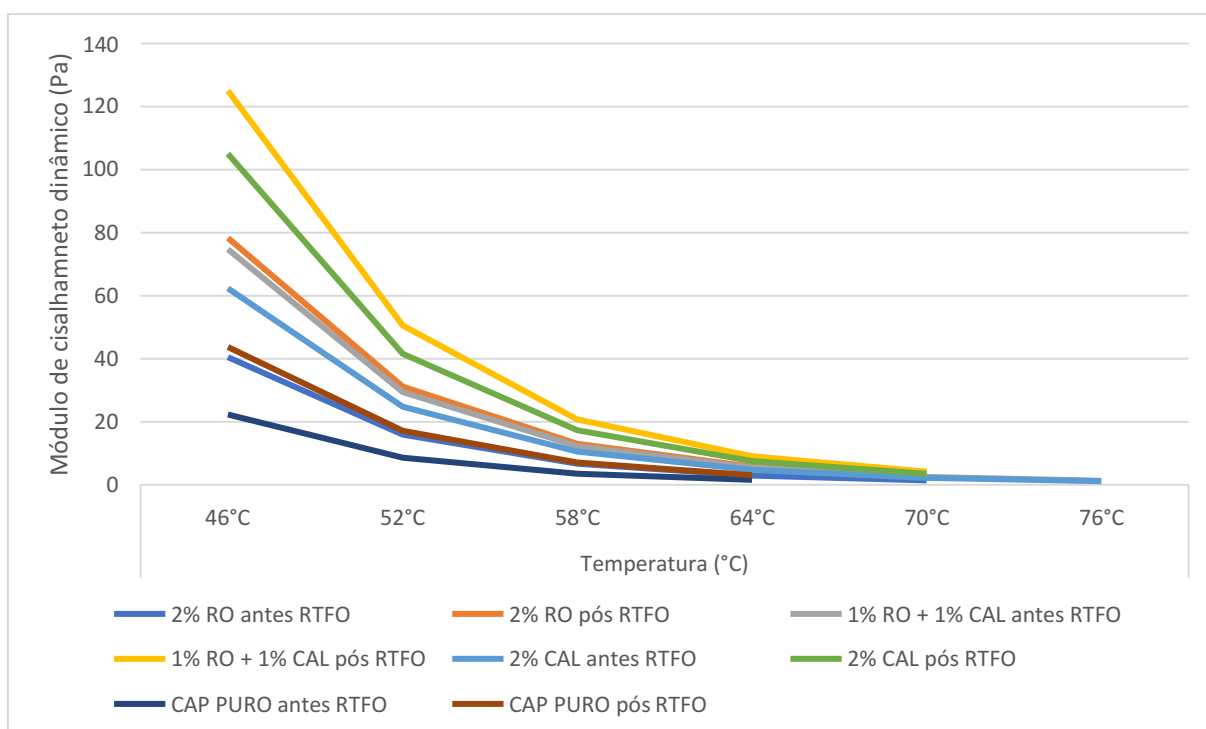
Dentre os mastiques utilizados, observou-se que a variação de massa do ligante modificado com RO em relação ao CAP puro não apresentou uma variação significativa de AI.

Os resultados obtidos corroboram com as afirmações de Cravo (2016), na qual, a participação do filer no mástique, retarda o processo degradativo, e este efeito pode ser explicado pelo fato de que a presença do filer no ligante pode criar uma barreira física entre a propagação das reações de oxidação.

Segundo Luz (2019), a redução na perda de massa dos ligantes modificados significa que seus componentes perderam menos suas propriedades viscoelásticas e que, provavelmente, poderão resistir mais ao enrijecimento na medida que envelhecem, resultando em maior durabilidade às deformações permanentes e à vida de fadiga dos pavimentos. Partindo deste pressuposto, a adição de 2% de cal e de 1% de cal + 1% de RO viram a colaborar com a durabilidade dessas misturas.

A Figura 35 ilustra o comportamento do módulo complexo de cisalhamento dinâmico no ligante puro e os mástiques asfálticos, antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO.

Figura 35 - Módulo de cisalhamento dinâmico antes e após RTFO



Fonte: Autor, 2021.

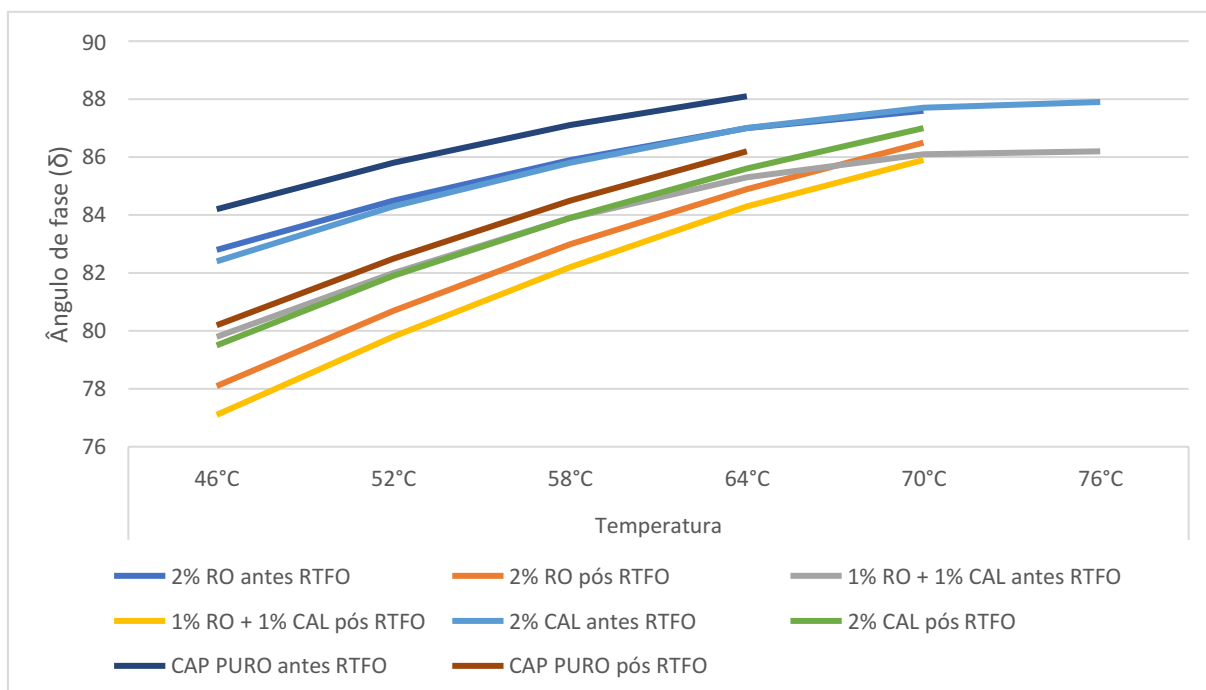
Analisando os resultados apresentados na Figura 36 foi possível observar que a presença do filer no cimento asfáltico de petróleo, formando o mástique asfáltico, provocou um aumento no módulo de cisalhamento dinâmico, sendo este, um indicador de resistência à deformação em

termos da elasticidade do ligante. Os ligantes modificados apresentaram maior rigidez que o CAP puro.

O envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO, ocasionou uma variação na rigidez, observa-se que essa variação foi mais acentuada nos mastiques asfálticos que utilizaram a cal como filer. No entanto Luz (2019) afirma que esse aumento na rigidez não necessariamente está correlacionado a melhoria no desempenho do cimento asfáltico de petróleo a altas temperaturas.

Na Figura 36, as curvas representam os resultados obtidos para o ângulo de fase do ligante puro e dos mastiques asfálticos, antes e após RTFO.

Figura 36 - Ângulo de fase antes e após RTFO



Fonte: Autor, 2021.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 36, observa-se que o mástico formado com a cal e o RO tiveram a melhor resposta elástica, seguido pelo mástico formado apenas com resíduo, e em ambos os casos, os materiais após o envelhecimento a curto prazo.

Considera-se que a aproximação dos ângulos de fase com 90° significa que o ligante é viscoso e com pouca, ou nenhuma, elasticidade. Ponto que pode ser observado na curva

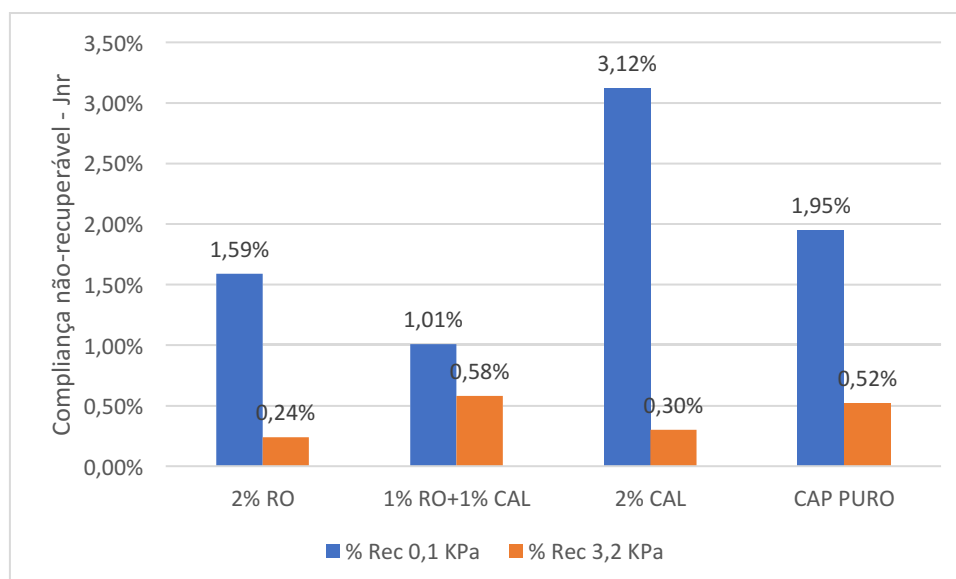
referente ao CAP puro antes RTFO como sendo a que mais se aproxima deste valor com o aumento da temperatura.

5.4 Fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)

Nesta etapa de pesquisa amostras de CAP puro e de mastiques asfálticos formados pela adição de 2% de cal, 1% de cal + 1% de RO e 2% de RO foram submetidas ao ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas. Ensaio que para Domingos et. al (2013) é visto como representativo para avaliação dos aumentos significativos da susceptibilidade a deformação permanente.

Na Figura 37, estão ilustrados o parâmetro de compliância não recuperável (Jnr) antes e após RTFO das misturas ensaiadas. Segundo Duarte (2018), quando menor o Jnr, maior a resistência a deformação permanente uma vez que o parâmetro Jnr está relacionado com a deformação que não foi recuperada durante o ensaio.

Figura 37 - Compliância não-recuperável porcentagem de recuperação à 0,1 e 3,2 kPa



Fonte: Autor, 2021.

Analisando a Figura 37, pode-se afirmar que em relação ao CAP puro o uso da cal como filer ocasionou um aumento da compliância não-recuperável, já o uso do RO como filer proporcionou uma diminuição dessa compliância não-recuperável.

Dessa forma, tem-se um indicativo positivo quanto a modificação do cimento asfáltico de petróleo com 2% de RO e 1% de RO + 1% de cal, uma vez que menores valores de Jnr indicam maior resistência do ligante à deformação permanente.

A incorporação de 1% de cal + 1% de RO foi a que apresentou o melhor indicativo quanto a susceptibilidade do ligante à deformação permanente.

A norma AASTHO M320 (2016) permite relacionar o parâmetro Jnr à 3,2 kPa com o volume de tráfego, conforme apresentado na Tabela 16. Essa classificação implementada pela FHWA (2002) divide-se em: tráfego padrão, pesado, muito pesado e extremamente pesado.

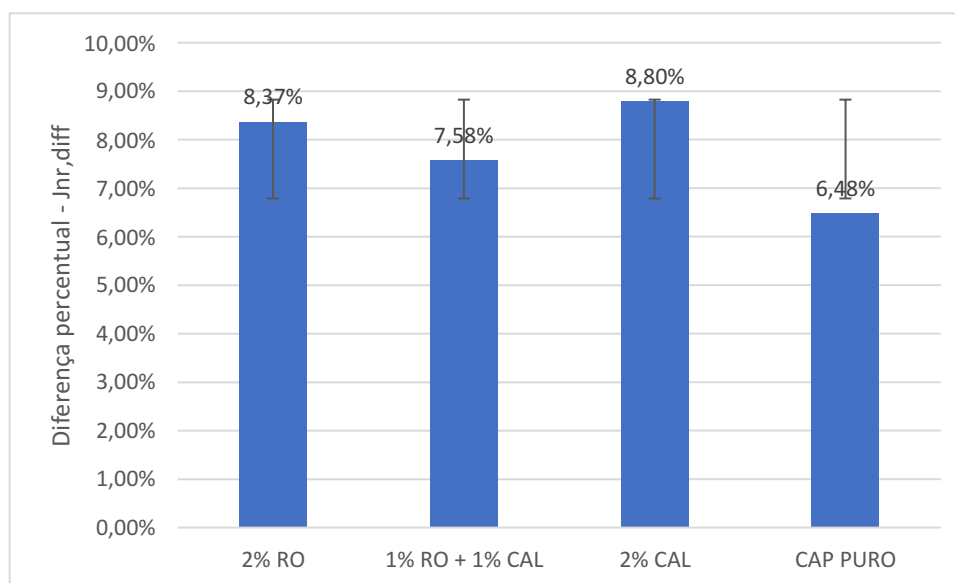
Tabela 24 - Classificação do volume de tráfego baseado no valor de Jnr a 3200 kPa

Propriedade	Valor máximo (kPa⁻¹)	Tipo de tráfego	Número de passadas de um eixo padrão
Jnr a 3200 kPa e na temperatura máxima de PG	4,0	Padrão (S)	<10 milhões
	2,0	Pesado (H)	>10 milhões
	1,0	Muito pesado (V)	>30 milhões
	0,5	Extremamente pesado (E)	>100 milhões

Fonte: Autor, 2021.

Os materiais estudados na pesquisa se enquadram na faixa de suporte para tráfego padrão (S), que é o intervalo de 2,0 kPa a 4,0 kPa.

Na Figura 38 estão ilustrados os valores de diferença percentual entre as complianças não-recuperáveis (Jnr,diff) à 0,1 kPa e 3,2 kPa, especificação estabelecida pela AASHTO MP 19:2010, que de acordo com Duarte (2018) indica a sensibilidade apresentada pelo cimento asfáltico de petróleo ao aumento de tensão. O limite superior para esse parâmetro é 75%, para que possa ser garantido que o material não possua sensibilidade excessiva à mudança de tensão e propensão ao surgimento de deformações permanentes. (NUÑEZ et. al, 2014)

Figura 38 - Diferença percentual – Jnr, diff

Fonte: Autor, 2021.

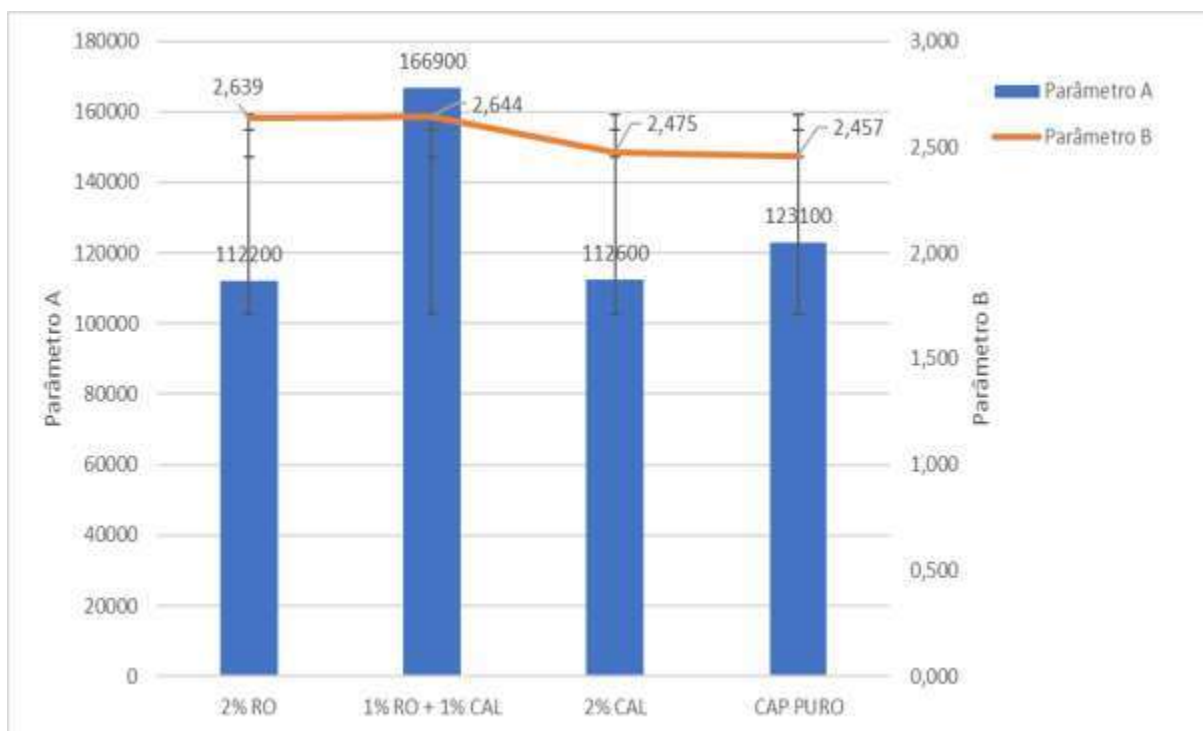
Tanto o ligante puro quanto os mastiques estudados apresentaram valores de Jnr,diff menores que 75%. Os mastiques apresentaram valores de Jnn, diff ligeiramente superiores ao ligante puro. Indicando que a adição de filer não foi benéfica em relação ao CAP puro, porém distante das preconizações normativas.

5.5 Varredura linear de amplitude de deformação (LAS)

O ensaio de varredura linear de amplitude de deformação foi realizado em duas fases, na primeira delas obteve-se os resultados experimentais dos parâmetros A e B e na segunda ocorreu a análise da vida de fadiga por meio do número de ciclos até a falha versus amplitude de deformação.

Na Figura 39 encontram-se representados os valores obtidos nos parâmetros A e B para o CAP puro e os mastiques asfálticos estudados.

Figura 39 - Parâmetros A e B



Fonte: Autor, 2021.

O parâmetro “A” representa a integridade do material em função da variação do dano acumulado. No modelo desenvolvido por Johnson (2010) reduções superiores a 35% do módulo inicial da amostra ($G \cdot \sin \delta$) são maiores representativos do aumento da vida de fadiga.

Ao analisar os resultados descritos na Figura 39, observamos que a combinação de 1% de RO + 1% de cal formou um mastique asfáltico com maior valor para o parâmetro “A” quando comparado com os demais mastiques e em relação ao CAP puro.

Comparando-se ao CAP puro, esse aumento foi de 35,6%, indicando aumento da resistência ao dano. Dentre os demais, observa-se que 2% de RO e 2% de cal, apresentam valores um pouco menores para o parâmetro A quando comparado ao CAP puro.

O parâmetro “B” está relacionado unicamente ao valor de α , obtido na etapa do ensaio de varredura de frequência, sendo determinado com base na inclinação do gráfico do módulo de armazenamento ($G \cdot \cos \delta$) versus a frequência. Kodrat et al. (2007) afirma que maiores valores absolutos do parâmetro “B” indicam que a vida de fadiga do material decresce a uma taxa maior quando a amplitude de deformação aumenta, assim como, menores valores absolutos

do parâmetro “B” indicam que a vida de fadiga do ligante decresce a uma taxa menor quando a amplitude de deformação aumenta.

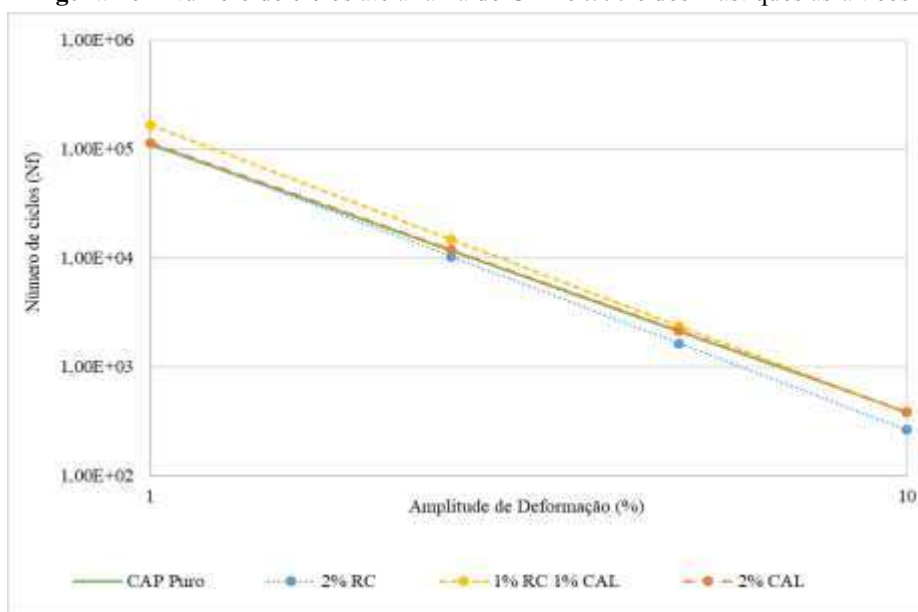
Na Figura 39 observa-se que o maior valor absoluto do parâmetro “B” é atingido pelo mastique formado por 1% de cal + 1% de RO, seguido de 2% de RO, 2% de cal e do CAP puro, respectivamente. A presença do RO influencia levemente na vida de fadiga do material, porém houve pequenas variações para este parâmetro, indicando que a sensibilidade aos níveis de deformação aplicada apresentou um comportamento praticamente constante em todas as amostras ensaiadas.

Por meio da teoria do dano contínuo viscoelástico (VECD) Hintz (2012) afirma ser possível construir um modelo que fadiga que demonstra o comportamento do cimento asfáltico de petróleo com relação ao dano em temperaturas intermediárias, para uma ampla faixa de deformações e de ciclos de carregamentos.

As condições que o material pode ser submetido estão relacionadas ao volume de tráfego que este suportaria, em função da deformação aplicada. De acordo com Sobreiro (2014) este volume é indicado pelo número de ciclos até a falha (Nf) e esta deformação está vinculada às condições em que os materiais poderiam ser submetidos em termos de estrutura do pavimento.

A Figura 40 ilustra os valores de vida de fadiga (Nf) em função da amplitude de deformação para as amostras ensaiadas.

Figura 40 - Número de ciclos até a falha do CAP 50/70 e dos mastiques asfálticos



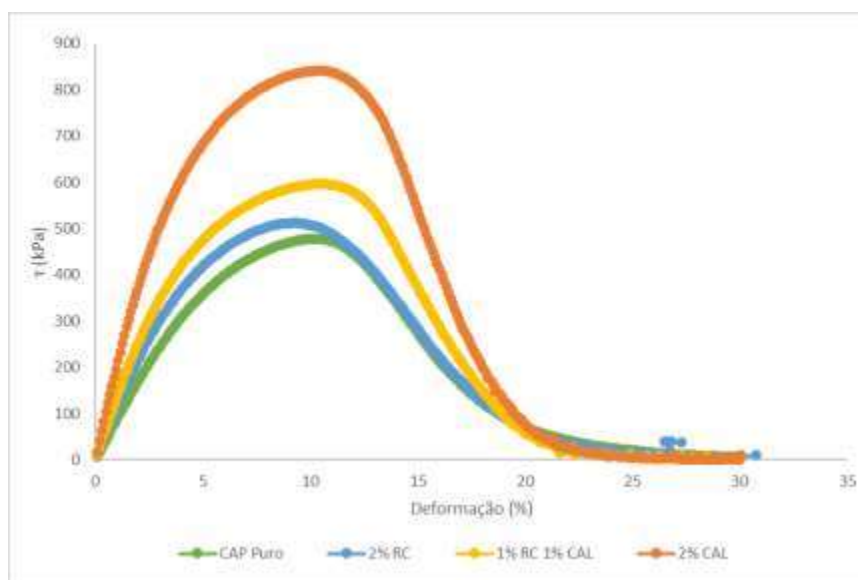
Ao analisar os dados da Figura 40, pode-se constatar que o mástique asfáltico formado com o 1% de RO + 1% de cal apresenta curva de fadiga superior, em boa parte das amplitudes de deformação, quando comparado a curva de fadiga obtida para o CAP puro. Nas amplitudes de deformação mais elevadas essas curvas tendem a se aproximarem.

Outro ponto a ser observado é que as curvas do CAP puro e do CAP com adição de 2% de cal apresentam comportamentos similares, chegando a serem praticamente coincidentes. Já a curva de fadiga do CAP com adição de 2% de RO apresenta similaridade a essas, sendo um pouco inferior a essas em boa parte das amplitudes de deformação mais elevadas.

Portanto, nota-se que a combinação de 1% de RO + 1% de cal contribuiu para o aumento da vida de fadiga em relação ao CAP puro e os demais mastiques estudados, no entanto esse aumento demonstrou-se mais expressivo nos baixos níveis de deformação do que nos altos.

Na Figura 41 são apresentados os dados de tensão de cisalhamento versus deformação obtidos por meio do ensaio de varredura de amplitude das amostras ensaiadas.

Figura 41 - Curvas de tensão x deformação



Fonte: Autor, 2021.

Ao analisar as curvas da Figura 41, verifica-se que todos os mástiques asfálticos atingiram maiores tensões de cisalhamento do que as tensões de cisalhamento alcançadas pelo CAP puro. Sendo que para deformações acima de 10% a curva do CAP puro converge para

valores similares ao do masticque com 2% de RO. Para deformações superiores a 20% as tensões de CAP e dos masticques asfálticos convergem para valores próximos.

Observa-se também que a formação dos masticques asfálticos (CAP + 2 % de cal, CAP + 1 % de RO + 1 % de cal, CAP + 2 % de RO), provocou a projeção dos picos para direita em relação ao CAP puro, indicando que os mástiques suportam maior tensão e deformação, sendo, portanto, mais resistentes.

A modificação do ligante com 2% de RO foi a que apresentou resultados semelhante a do CAP puro, entretanto esta modificação também incrementou a resistência a deformação e o pico de tensão cisalhante com relação ao ligante puro.

Diante do exposto nesta análise reológica, por meio da observação dos resultados obtidos, conclui-se que o mástique asfáltico formado por CAP + 1 % de RO + 1 % de cal, apresenta o melhor conjunto de propriedades reológicas entre as amostras ensaiadas, indicando um desempenho superior deste material.

5.6 Resistência a tração por compressão diametral (RT)

A resistência a tração por compressão diametral (RT), traduzira o quanto o pavimento resistirá sem se deteriorar quando submetido a esforços de tração devido a aplicação de uma força de compressão diametral.

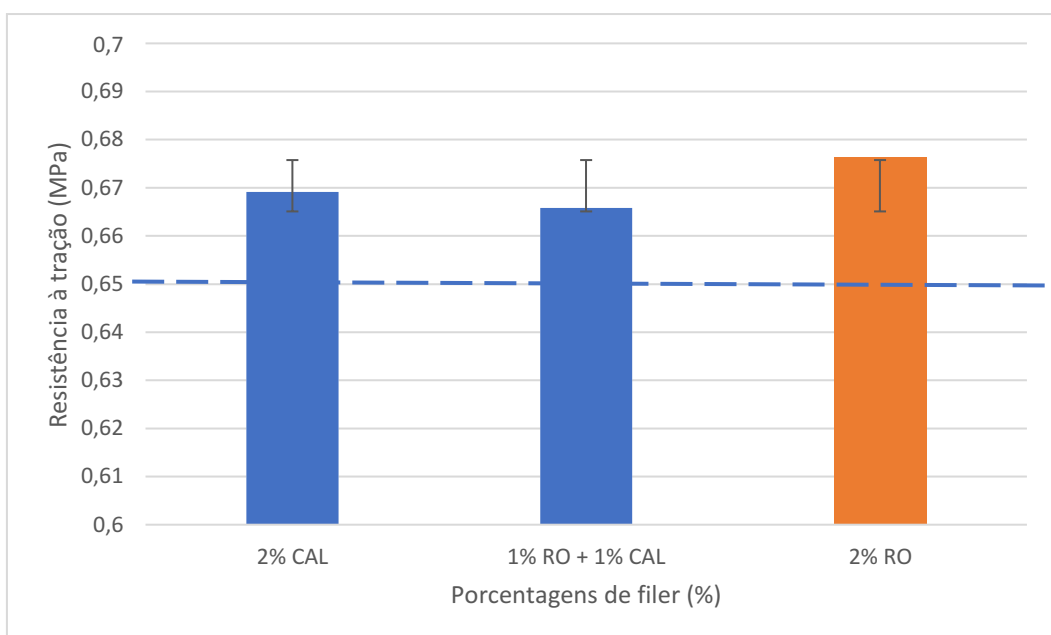
Na Tabela 24 e na Figura 42 estão apresentados os resultados do referido ensaio, considerando que as misturas asfálticas foram dosadas com os seguintes teores de filer para confecção do traço: 2% cal (mistura de referência), 1% de cal + 1% de (RO) e 2% de RO. No ensaio foram utilizados três corpos de prova (cp's) (Figura 48) para cada teor citado, assim os resultados mostrados são a média dos cp's ensaiados.

As especificações técnicas de serviço para mistura asfáltica usinada a quente para CAP convencional, DNIT 031/06 – ES, determinam que 0,65 MPa é a RT mínima a ser obtida em uma mistura asfáltica usinada a quente utilizada em camadas de rolamento.

Tabela 25 - Resultados do ensaio de RT

Amostras	2% CAL	1% RO + 1% CAL	2% RO
RT (MPa)	0,67	0,66	0,68

Fonte: Autor, 2021.

Figura 42 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Autor, 2021.

Todas as combinações de fileres ensaiadas atingiram o parâmetro mínimo de RT exigido pela norma DNIT 031/06 – ES. A partir dos desvios padrões indicados na Figura 43 foi possível observar que os resultados obtidos não divergem significativamente uns dos outros, sendo a mistura com 2% de RO a que apresentou maior valor de RT.

Bandeira (2019) obteve resultados de RT, médio utilizando CAP 50-70, de 0,68 MPa, ao adicionar 3,4% de cascalho de perfuração de petróleo e 1% de material de enchimento filer na fabricação de mistura asfáltica usinada a quente.

Lucena (2008) encontrou valores de RT médio superiores ao mínimo exigido pelo DNIT, sendo eles de 0,819 MPa, 0,806 MPa, 0,899 MPa, 0,937 MPa para os respectivos valores de incorporação de RO 2%, 3%, 4% e 5%.

5.7 Módulo de Resiliência (MR)

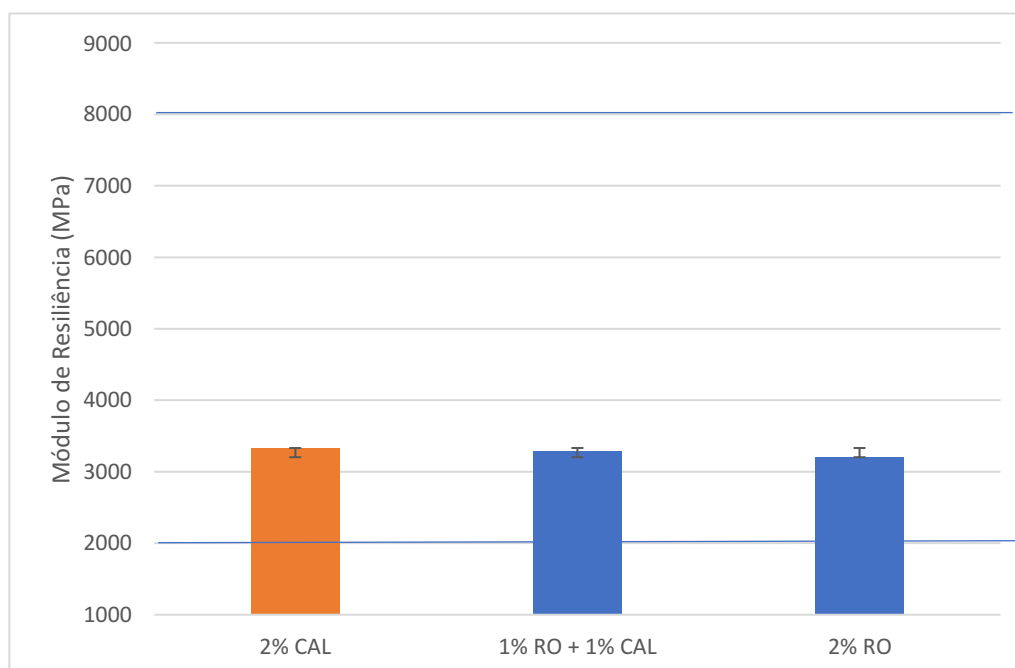
O ensaio de módulo de resiliência foi realizado seguindo as especificações da norma ABNT NBR 16018/2011. Na Tabela 17 e na Figura 43, estão dispostos a média, de 3 (três) CPs ensaiados para cada teor de filer estudado, dos resultados dos módulos dinâmicos instantâneos.

Tabela 26 - Resultados do ensaio de MR instantâneo a 25°C

Amostras	2% CAL	1% RO + 1% CAL	2% RO
MR (MPa)	3325	3280	3199

Fonte: Autor, 2021.

Figura 43 - Resultados do MR (MPa) instantâneo a 25°C



Fonte: Autor, 2021.

Bernucci et. al (2010), afirmam que o módulo de resiliência assume valores típicos situados numa faixa entre 2000 e 8000 MPa a temperatura de 25°C, observou-se que todas as misturas, independente do filer adicionado, apresentaram os resultados dentro desta faixa.

Percebe-se ocorrência da diminuição do módulo de resiliência com a substituição parcial do filer cal pelo filer RO (diminuição 1,35 %) e esse fenômeno acentua-se quando ocorre a

substituição total da cal pelo RO (diminuição de 3,79%). Porém, constata-se por meio da análise dos desvios padrões que essa substituição de filer não ocasiona perdas significativas nos valores de MR das misturas estudadas.

A análise dos desvios padrões permite inferir que os resultados apresentados são próximos. A ocorrência de diferentes resultados pode ter sido ocasionada por uma amostra que destoa das demais.

Observa-se pelos resultados obtidos que os módulos de resiliência apresentados na Tabela 17 e Figura 43 não diferem significativamente uns dos outros, sendo o resultado do uso de 2% da cal como filer o que apresentou melhor desempenho.

5.8 Resistência ao dano por umidade induzida – Lottman Modificado

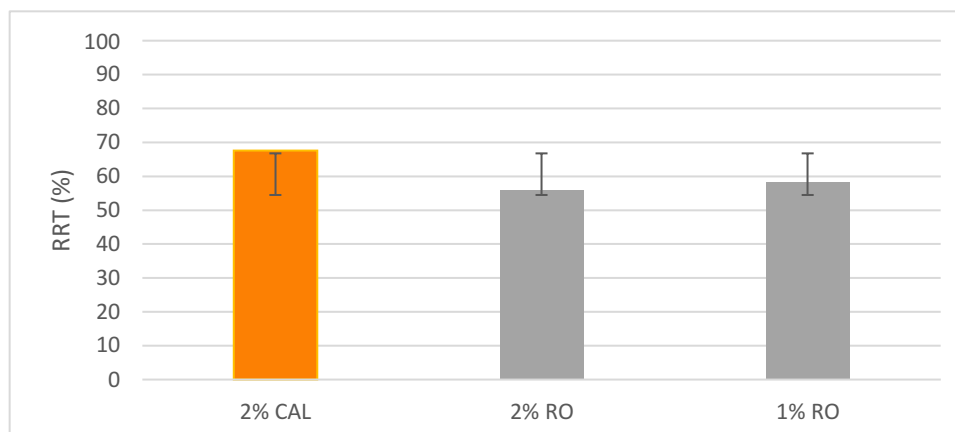
O ensaio de resistência ao dano por umidade induzida, ou Lottman modificado, avalia a resistência da combinação particular de asfalto, agregado e aditivos simulando a perda de resistência ou outros danos causados pela umidade no pavimento, consistindo em submetê-los à ação da água e a ciclos de gelo-degelo. (COSTA, 2018)

O ensaio de Lottman modificado foi realizado seguindo as especificações da norma AASHTO T 283-14. Na Tabela 26 e na Figura 44 estão apresentados os resultados de RRT para cada tipo de filer usados.

Tabela 27 - Resultados do ensaio de Lottman modificado

Amostras	2% CAL	1% RO + 1% CAL	2% RO
RRT (%)	67,55	58,32	55,89

Fonte: Autor, 2021.

Figura 44 - Resultados do ensaio de Lottman modificado

Fonte: Autor, 2021.

As especificações da norma AASHTO T 2883 (2014), estabelecem que a RRT (%) admitida para as misturas asfáltica deve ser maior que 80%. A especificação do DNIT 031/2006 recomenda que este valor deve ser de 70%.

Na Tabela 18 e na Figura 44, observa-se que nenhuma das misturas atingiu os critérios estabelecidos pelas normas citadas, apresentando RRT (%) de 67,55 para 2% de cal, 58,32 para 1% R0 + 1% CAL e 55,89 para 2% de RO.

De acordo com o Asphalt Institute (2014), em uma dosagem realizada pelo método SUPERPAVE a resistência retida à tração mínima deve ser de 80%. Entretanto, resultados de 60% ou menores são inaceitáveis, pois indicam a susceptibilidade da mistura à umidade. No entanto valores iguais ou superiores a 80% foram considerados altos, e assim muitas outras agências de estudos começaram a aceitar valores de resistência retida à tração de 70% ou maiores, valor baseado em novas avaliações laboratoriais e experiências práticas. (COSTA, 2018)

Analisando os resultados de resistência retida à tração, expostos da Tabela 18 e Figura 51, as misturas com 1% R0 + 1% CAL e 2% de RO apresentaram maior propensão a susceptibilidade ao dano por umidade, sendo possível ocorrer maiores problemas de desagregação de agregados. Além disso, os resultados foram inferiores a 60% que de acordo com o Asphalt Institute (2014) são inaceitáveis.

Apesar de o resultado do ensaio com o teor de 2% de cal (67,55%) ter sido superior aos demais e aos 60% citados pelo Asphalt Institute como inaceitáveis, ainda assim não foi um

resultado totalmente satisfatório, pois não atingiu o mínimo exigido pelas referências normativas vigentes.

Os desvios padrões ilustrados na Figura 44 permitem inferir que os resultados de RRT não estão na mesma faixa de desvio padrão. O resultado superior de RRt (%) quando utilizado apenas a cal hidratada em detrimento as demais combinações de fileres, permite visualizar que a cal melhora a adesividade da mistura, porém não garantiu a eficiência da adesividade entre ligante e agregado. Porém, o resultado se apresenta próximo ao requerido pelo DNIT.

Os resultados obtidos corroboram com o esperado, uma vez que o CAP 50/70 e o agregado utilizado não apresentaram a adesividade requerida. Vale salientar que o objetivo da pesquisa não é garantir o melhor desempenho da mistura ao adicionar o RO.

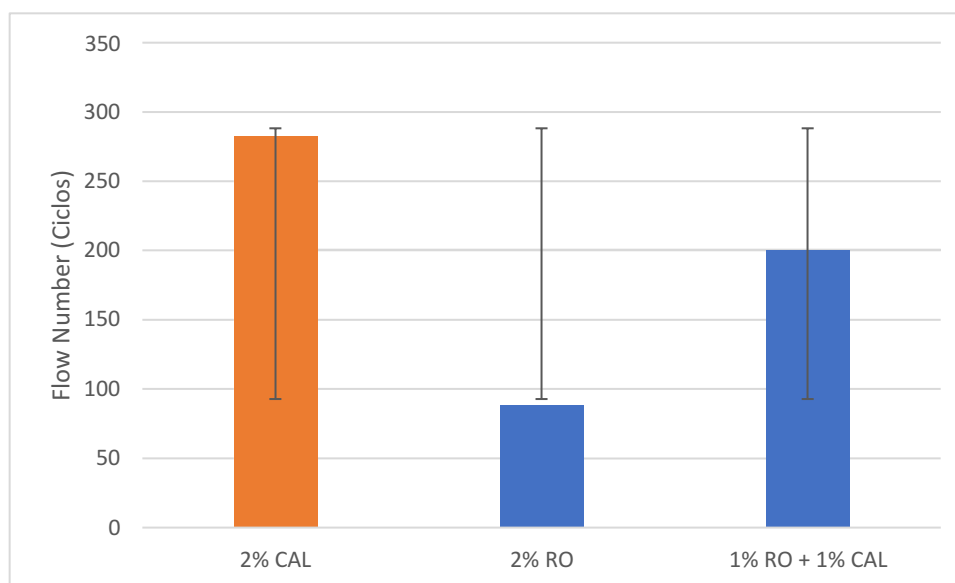
Lucena (2008) ao utilizar 2, 4 e 5% de resíduo oleoso como filer obteve resultados de RRT acima do limite preconizado pela metodologia SUPERPAVE (mínimo de 80%), no seu trabalho indicou que para mistura estudada, o teor ideal de filer resíduo oleoso que pode ser incorporado na composição do material asfáltico pode ser de 2, 4 ou 5%.

5.9 Flow Number (FN)

Para o desenvolvimento deste trabalho, organizou-se um banco de dados contemplando informações referentes a 3 misturas asfálticas que foram submetidas ao ensaio uniaxial de carga repetida seguindo as especificações da norma ABNT NBR 16505/2016, obtendo-se seus respectivos FNs.

Na Figura 45, estão apresentados os resultados de Flow Number para as misturas asfálticas puras e para as formadas a partir da adição de filer, os resultados obtidos são referentes as médias de 3 (três) cp's para cada mistura ensaiada.

Figura 45 - Resultados do ensaio de FN



Fonte: Autor, 2021.

Observa-se que nenhuma das misturas ensaiadas atingiram os valores de FN apontados por Nascimento (2008) como recomendado que é 300 ciclos para tráfego médio (Tabela 19). Já para os critérios americanos de acordo com o preconizado por Advanced Asphalt Technologies - ATT (2011), Bonaquist (2012) e NCHRP 09-33 as misturas com 1% RO e 2% de cal atingiram resultados satisfatórios para desempenho em tráfego pesado.

Bastos (2017) aponta que os critérios de FN para os tráfegos médios e pesados indicados para misturas asfálticas brasileiras são quase 6 vezes maiores que os indicados para misturas asfálticas americanas sugerindo que os critérios brasileiros são conservadores.

A comparação presente nesse trabalho se dá apenas a título de informação, uma vez que os ensaios foram realizados seguindo as especificações da norma brasileira. Sendo assim, para uma comparação mais fidedigna seria necessário a confecção de cp's seguindo os critérios de cada uma das pesquisas citadas na Tabela 19.

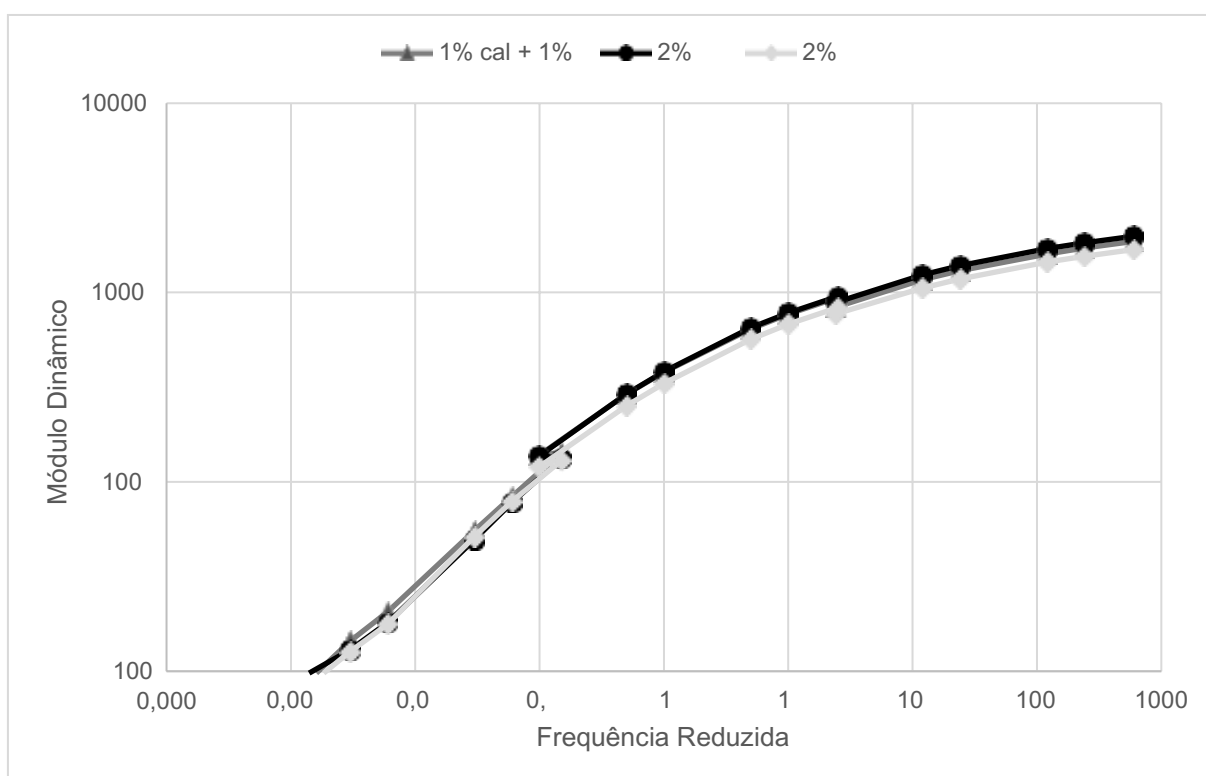
Ao analisar os desvios padrões dos resultados apresentados na Figura 46 observa-se que as amostras com 2% de RO e com 1% de RO + 1% de cal apresentaram resultados inferiores a amostra com 2% de cal, porém com um desvio padrão acentuado em ambas. A diferença entre esses resultados pode ter sido ocasionada pela presença de uma amostra com FN destoante das demais amostras ensaiadas.

Dentre as misturas asfálticas ensaiadas, a com adição de cal como filer foi a que apresentou o melhor desempenho chegando a se aproximar dos 300 ciclos recomendados por Nascimento (2008). E o menor desempenho ocorreu quando houve a adição apenas de RO sinalizando que a cal proporcionou uma melhor resistência à deformação permanente.

5.10 Módulo Dinâmico

Os resultados do módulo dinâmico, foram obtidos por meio da média de 3 cp's para cada filer adicionado na mistura. A Figura 46 apresenta os resultados do ensaio de módulo dinâmico de todas as amostras para cada temperatura por meio de suas curvas mestras.

Figura 46 – Curvas mestras das misturas asfálticas a 4°C, 20°C e 40°C



Os gráficos permitem observar um comportamento semelhante nas três temperaturas de ensaio para as misturas asfálticas analisadas, com valores bem próximos entre elas. A mistura asfáltica com presença de 2% de cal apresentou valores sensivelmente maiores a temperaturas de 4°C e 20°C (Figura 46), e menores valores de módulo dinâmico a 40°C. Verificou-se que o módulo dinâmico é diretamente proporcional ao aumento da frequência de aplicação de carga

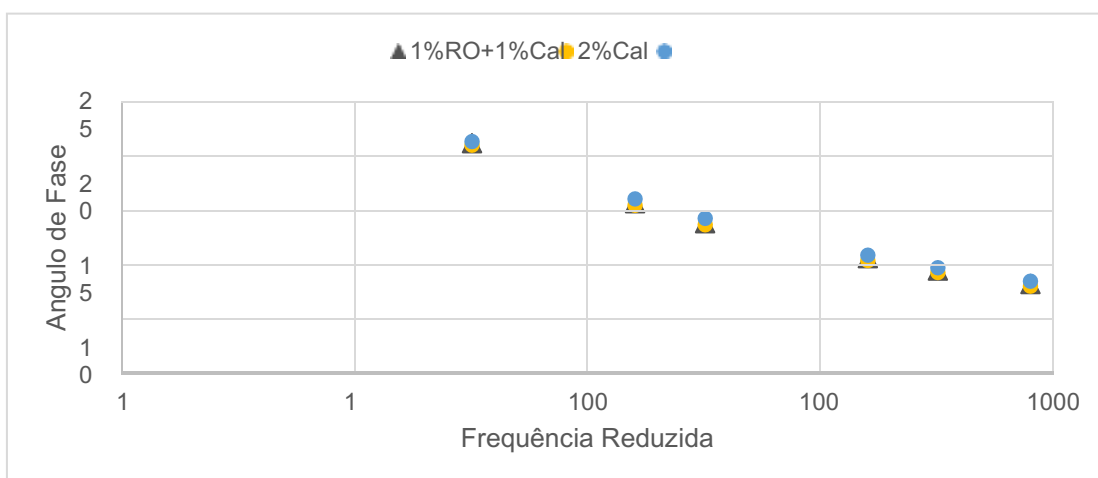
e à diminuição da temperatura, sendo que as amostras com resíduo oleoso apresentaram menor suscetibilidade a temperatura mais elevada de teste, conforme a Figura 46.

Sabe-se que o módulo dinâmico e o ângulo de fase compõem as propriedades viscoelásticas lineares fundamentais, contabilizando os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento neste comportamento (MENDONÇA, 2020).

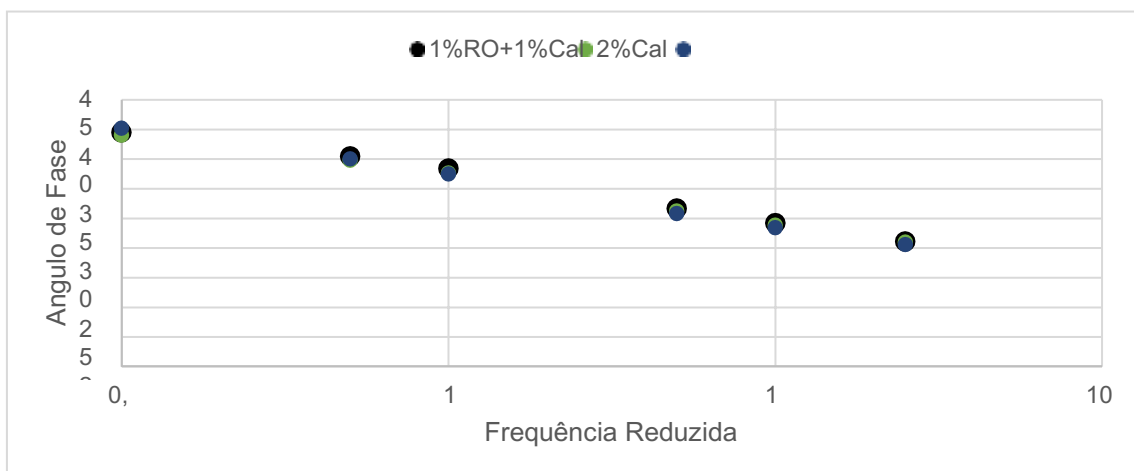
A característica viscoelástica do material é definida pelo ângulo de fase, que representa a diferença entre o pulso de tensão e o pulso de deformação, quanto maior for este ângulo maior será a viscosidade e menor a elasticidade (PORTO, 2019). A Figura 47 apresenta os gráficos que relacionam os ângulos de fase às frequências de ensaio, obtidos no ensaio de módulo dinâmico, para cada temperatura de teste.

Figura 47 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento: a) 4°C, b) 20°C, c) 40°C

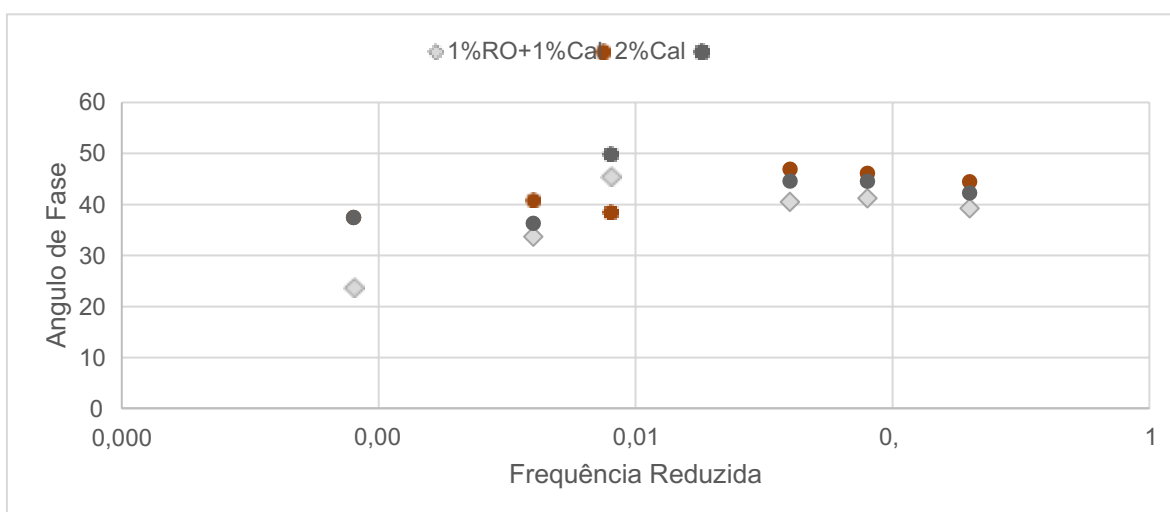
a)



b)



c)



Conforme resultados obtidos, verificou-se que ocorreu um acréscimo no ângulo de fase à medida que a temperatura aumenta e uma redução com o aumento da frequência. Para as menores temperaturas é observado que as misturas contendo 2% de RO e a 1% de RO + 1% de cal apresentam maiores ângulos de fase, quando comparadas a mistura composta apenas de cal, indicando maior viscosidade. No entanto, na maior temperatura de teste, 40°C, a mistura com 1% de RO + 1% de cal apresentou os menores valores de ângulo de fase, e as misturas com apenas resíduo oleoso e apenas cal apresentaram melhores resultados, inferindo melhores resultados a elevadas temperaturas quando há incorporação de apenas um material na mistura asfáltica.

Em menor temperatura o ângulo de fase aumenta sendo a maior parte da energia dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, indicando que a relação entre o ângulo de fase em baixa temperatura e baixa frequência é atribuída ao ligante. O ângulo de fase a alta temperatura e baixa frequência é afetado pelo agregado e a maior parte da energia é atribuída à interação ligante-agregado que tende a diminuir o ângulo de fase. Essa característica reflete na resposta do material aos carregamentos impostos, sendo que quanto menor o ângulo de fase, mais predominante é a componente elástica do módulo complexo (ALI *et al.*, 2016).

6 CONCLUSÕES

Este capítulo foi dedicado a apresentação das conclusões do trabalho, baseadas na análise dos parâmetros reológicos e mecânicos das misturas estudadas. Com enfoque em exaltar os principais pontos dos resultados alcançados. Sendo por último apresentadas as considerações finais.

6.1 Conclusões

A incorporação de resíduo oleoso foi realizada a partir da substituição da porcentagem de filer obtida por meio da dosagem SUPERPAVE. O melhor enquadramento da granulometria dos agregados e filer (cal) utilizados na curva fuller foi utilizando 2% de cal. Esses 2% de cal foram substituídos integralmente por 2% de RO e parcialmente 1% de RO + 1% de cal.

A partir dos ensaios realizados em laboratório e análise dos resultados obtidos foi possível extrair as seguintes análises:

6.1.1 Conclusões dos ensaios mecânicos

Todas as misturas asfálticas analisadas nesta pesquisa atingiram o parâmetro mínimo de RT exigido, sendo que a adição de 2% de RO proporcionou o RT mais elevado dentre elas, porém não divergindo significativamente das demais misturas ensaiadas.

A mistura com adição de 2% de cal atingiu um MR 1,35% superior a mistura com 1% de cal + 1% de RO e 3,79% a mistura com 2% de RO.

As misturas estudadas não atingiram os parâmetros mínimos de RRt preconizados pela bibliografia. Esse resultado condiz com o resultado não satisfatório no ensaio de adesividade do cimento asfáltico de petróleo ao agregado, sugerindo a necessidade de adição de um

melhorador de adesividade no ligante CAP 50/70 visando promover uma maior adesão entre agregado e ligante.

Todas as misturas estudadas apresentaram valores baixos de Flow Number, não chegando a atingir o mínimo de 300 ciclos para tráfego médio. Sendo a mistura com 2% de cal a que mais se aproximou de atingir este parâmetro mínimo. Apesar de as misturas não terem sido confeccionadas com os parâmetros exigidos pela norma americana ou por pesquisas americanas, as misturas com 1% de cal + 1% RO e 2% de cal atingiram resultados satisfatórios para desempenho em tráfego pesado segundo essas referências.

Por meio da análise das curvas mestras foi possível observar um comportamento semelhante das misturas asfálticas nas três temperaturas de ensaio. A mistura asfáltica com presença de 2% de cal apresentou valores sensivelmente maiores a temperaturas de 4°C e 20°C, e menores valores de módulo dinâmico a 40°C. Já as amostras com resíduo oleoso apresentaram menor suscetibilidade a temperatura mais elevada de teste.

Quanto a parâmetros de deformação permanente as misturas ensaiadas não obtiveram resultados satisfatórios de acordo com as exigências brasileiras, porém em relação a pesquisas americanas as misturas 1% de cal + 1% RO e 2% de cal atingiram resultados satisfatórios para desempenho. Levando em consideração o ensaio de FN para avaliar a deformação permanente.

Considerando-se o ensaio de MR e MD para analisar a fadiga nessas misturas concluiu-se que a mistura com 2% de cal foi a que obteve resultados mais satisfatórios. As demais atingiram parâmetros mínimos de MR, porém inferiores a adição de 2% de cal.

Após as análises mecânicas verifica-se a viabilidade técnica de utilização de todas as misturas estudadas em obras de pavimentação. Desde que observada as condições de utilização, atentando a necessidade de melhoria da adesividade do cimento asfáltico de petróleo ao agregado utilizado. A mistura com 2% de cal foi a que melhor se adequou aos parâmetros normativos exigidos pelos ensaios de resistência mecânica.

6.1.2 Conclusões dos ensaios reológicos

Entender o comportamento e as interações dos materiais presentes no pavimento asfáltico é uma das maneiras relevantes para desenvolver uma estrutura que apresente conforto e segurança aos usuários. O estudo do comportamento do mástique asfáltico, permite

compreender as interações que filer dispõe no ligante e, conseqüentemente, na mistura asfáltica, podendo ajudar a prever o desempenho do pavimento.

Associar um estudo com mástique asfáltico a um material que é visto como uma possibilidade de utilização nos pavimentos, garante que, exista uma maior confiabilidade nesta hipótese, indicando melhor o desempenho do material.

Desta maneira, os resultados reológicos atribuídos ao mástique asfáltico formado a partir do resíduo de cascalho, indica que a incorporação deste filer, provoca ao ligante um aumento na viscosidade e no módulo complexo, refletindo em uma menor susceptibilidade a variação de temperatura, e conseqüentemente, uma maior resistência à deformação permanente. Também foi interpretado, que a incorporação do resíduo de cascalho provocou uma redução à resistência ao dano e uma menor vida de fadiga ao ligante nas maiores amplitudes de deformação.

Avaliando o efeito do envelhecimento a curto prazo em estufa RTFO, foi verificado que a incorporação do resíduo de cascalho no cimento asfáltico de petróleo, não modifica a temperatura de falha no grau de desempenho (PG) após o envelhecimento, e o índice de envelhecimento (AI) apresenta valores semelhantes aos obtidos para o CAP puro.

Nesta pesquisa, também foi avaliado as propriedades reológicas dos mástiques asfálticos formados com a cal, sendo verificado que está incorporação é benéfica para o ligante, aumentando o módulo complexo e reduzindo o ângulo de fase, conforme é indicado pela bibliografia. Para essas amostras, foi constatado que houve redução no índice de envelhecimento (AI) do ligante, indicando que a interação deste filer mineral com o ligante, reduz as reações que provocam o envelhecimento.

Por fim, é destacado que a incorporação conjunta do resíduo de cascalho e da cal, proporcionou ao material o melhor desempenho reológico, indicando uma possível relação favorável desses materiais ao cimento asfáltico de petróleo.

6.2 Sugestões para pesquisas futuras

Neste tópico com a finalidade de aprofundamento desta pesquisa, são feitas algumas sugestões para serem exploradas em pesquisas futuras:

- ✓ Realizar o ensaio de curva mestra para confirmação dos valores de ângulo de fase obtidos por meio do ensaio de PG, objetivando obter maior confiabilidade de resultados;
- ✓ Realização do FTI dos mastiques asfálticos objetivando compreender os tipos de reações entre o ligante e o mineral, pois são elas que determinam as propriedades dos materiais;
- ✓ Realização do LAS com amostras envelhecidas por meio de PAV, uma vez que mediante as limitações laboratoriais as amostras foram envelhecidas por processo de RTFO;
- ✓ Utilizar melhoradores de adesividade para avaliar o dano por umidade das misturas asfálticas com adição do RO como filer;
- ✓ Avaliar o comportamento das propriedades mecânicas das misturas asfálticas com adição de RO como filer numa faixa mais abrangente de teores de incorporação, por meio da utilização de softwares estáticos para validação da pesquisa;
- ✓ Analisar o desempenho da vida de fadiga das misturas estudadas por meio da realização do ensaio de Fadiga;
- ✓ Realizar um comparativo em termos financeiros das misturas asfálticas usando um determinado material como filer em relação as misturas asfálticas com substituição deste material pelo RO, visando analisar a viabilidade financeira.

7 REFERÊNCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO TP 70. **AASHTO TP 79/16, STANDARD METHOD OF TEST FOR DETERMINING THE DYNAMIC MODULUS AND FLOW NUMBER FOR ASPHALT MIXTURES USING THE ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE TESTER (AMPT)**. Washington, D.C., 2016.

_____. **AASHTO T 283, STANDARD METHOD OF TEST FOR RESISTANCE OF COMPACTED ASPHALT MIXTURES TO MOISTURE-INDUCED DAMAGE**. Washington, D.C., 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16018**. Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **ABNT NBR 16505**. Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida. Rio de Janeiro, 2016.

ASPHALT INSTITUTE. ASPHALT MIX DESIGN METHODS: Superpave series SP-2 (MS-2). 7. Ed. 2014.

Advanced Asphalt Technologies, LLC. (2011) A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary (NCHRP Report 673). TRB, National Research Council, Washington DC, 285.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

Asfaltos. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/distribuidor/1001-asfaltos>. Acesso em: 23/03/2020.

AGOSTINI, R. M. **Solidificação/Estabilização de resíduos sólidos oleosos de atividades de exploração e produção de óleo e gás em matrizes de cimento.** 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

ALI, Y. IRFAN, M.; AHMED, S.; KHANZADA, S.; MAHMOOD, T. Investigation of factors affecting dynamic modulus and phase angle of various asphalt concrete mixtures. **Materials and Structures**, v. 49, p. 857–868, 2016.

ARAÚJO, Victor Mosca de Carvalho; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo; LIMA, Danielle Monteiro; CAVALCANTE, Rivelino Martins. Avaliação Ambiental da utilização de solo contaminado por derivados de petróleo (SCDP) em misturas asfálticas. **Transportes**. v. 24, n. 2, sep 2016.

ASMAEL, N. M. Effect of mineral filler type and content on properties of asphalt concrete mixes. **Journal of Engineering**, v. 16, n. 3, sep 2010.

BANDEIRA, Rafaely Angélica Fonseca. **Uso do cascalho de perfuração de poços de petróleo na confecção de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado à Quente).** 2019. 103 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2019.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos; KLINSKY, Luís Miguel Gutiérrez; JÚNIOR, José Leomar Fernandes. A importância do filer para o bom desempenho das misturas asfálticas.

Revista Minerva (São Carlos), v.7, n.1, p.71-78, jan./abr.2010. Disponível em: [http://www.fipai.org.br/Minerva%2007\(01\)%2009.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2007(01)%2009.pdf). Acesso em: 24 mar. 2020.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos; KLINSKY, Luís Miguel Gutiérrez; JÚNIOR, José Leomar Fernandes. Influência do fíler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. **TRANSPORTES**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 19-26, 15 ago. 2012.

BASTOS, Juceline Batista dos Santos; SOARES, Jorge Barbosa; NASCIMENTO, Luís Alberto Herrmann. Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. **TRANSPORTES**, v.25, n.2, p. 29-40, 31 ago. 2017.

BARROS, Ravenna Maria Monteiro. **Incorporação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo em formulações cerâmicas**. 2015. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2015.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Petrobras, 2010.

BONAQUIST, R. (2012). Evaluation of Flow Number (FN) as a discriminating HMA mixture property. **Wisconsin Highway Research Program**. Projeto Número 0092-09-01.

S. B. Breitenbach, O. C. Santos, J. C. S. Andrade, R. M. Nascimento, A. E. Martinelli. Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro a base de cal. **Cerâmica**. n. 63, p.395-401, 2017.

BOCK, André Luiz. **Desempenho à fadiga de misturas em concreto asfáltico com diferentes formas de incorporação de cal.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2009.

BORGES, Paulo Roberto. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente analisadas pelos métodos de dosagem Marshall e Superpave.** 2019. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.

BRITO, André Luiz Fiquene. **Protocolo de avaliação de materiais resultantes da estabilização por solidificação de resíduos.** 2007. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

CAMPANHA, Ângela. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** 2011. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

CARVALHO, Jeovanesa Régis. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2018.

CENTOFANTE, Roberta; SPECHT, Luciano Pivoto; JUNIOR, Pedro Orlando Borges de Almeida; PINHEIRO, Rinaldo José Barbosa; PEREIRA, Deividi da Silva. Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.1-19, 18 out. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0512>.

COSTA, Daniel Beserra. **Análise da deformação permanente de misturas asfálticas a partir dos critérios de mohr coulomb.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

COSTA, Laiana Ferreira. **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

CRAVO, Margareth Carvalho Coutinho. **Efeitos do Envelhecimento Térmico e Fotoquímico em Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz de Agregados Finos.** 2016. 251 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, RJ, 2016.

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-mix asphalt: European practice.** International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008

DEHOUCHE, N.; KACI, M.; MOKHTAR, K.A. Influence of termo-oxidative aging on chemical composition and Physical properties of polymer modified bitumens. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 350-356. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ME 078/94:** Agregado graúdo – adesividade ao ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNIT– ME 083/98:** Agregados – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNIT – ME 035/98:** Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNIT– ME 057/97:** Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNIT - ME 086/94:** Agregado - Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNIT - ME 084/95:** Agregado miúdo - Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **DNIT - ME 081/98:** Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNIT – EM 095/2006:** Cimentos asfálticos de petróleo – Especificações de material. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT - ME 136/18:** Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão. Rio de Janeiro, 2018

_____. **DNIT – ES 031/2004:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **DNIT - ES 031/2006:** Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT - ES 385/99:** Pavimentação - Concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro, 1999

_____. **DNIT - ME 367/97:** Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNIT - PRO 199/96:** Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996

EING, Marco Antônio. **Análise da incorporação de cinza volante e pesada em dosagens de misturas asfálticas densas.** 2018. 71 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenheiro de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2018.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. **Avaliação do Comportamento Fluência-Recuperação de Ligantes Asfálticos com SBS e Ácido Polifosfórico.** Revista Transportes, v. 21, p. 51-58. 2013.

DUARTE, Érika Vitória de Negreiros. **Avaliação reológica de ligante asfáltico 50/70 modificado com polímero reativo e não-reativo associado a ácido poli fosfórico.** 2018. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2018.

FAGUNDES, Thais Bortotti. **Caracterização de cascalhos de perfuração de poços de petróleo por técnicas analíticas instrumentais**. 2018. 223 f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia de Petróleo), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2018.

FERREIRA, Alan Martins. **Produção de cimento asfáltico de petróleo modificado por copolímeros elastoméricos tipo poliésteres, produzidos com polióis derivados de biomassa e ácido adípico**. 2018. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Industrial, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2018.

FHWA. **Superpave Binder Specification**. Federal Highway Administration. Washington. 2002.

FIALHO, Poliane Fernandes. **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo do potencial de aplicação em concreto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

FILHO, Paulo Germano Tavares Marinho. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas e dióxido de titânio**. 2017. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2017.

FONSECA, M. H. G. P. **Estudo do resíduo oleoso das atividades de exploração e produção de petróleo na manutenção de estradas de terra: enfoque ambiental**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2003.

FREITAS, Felipe Natan R.; FERREIRA, Wellington Lorrann Gaia; BRANCO, Verônica T. F. Castelo. Avaliação da relação entre o dano por umidade e a permeabilidade de misturas asfálticas contendo cinza volante como filler. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 11, n. 1, p.18-29, abr. 2019.

FREITAS, Rodrigo Dias. **Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado a quente**. 2010. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

FURLAN, A.; GOUVEIA, L.T.; FABBRI, G. T. P.; FERNANDES Jr, J. L. **Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas**. IBP - 17º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

GAMA, Dennyale Alves. **Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos**. 2016. 167 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016.

GADLER, F.; VILLENA, J.; MIRANDA, L. F. R. **Efeito do tipo de compactação, por impacto ou por amassamento, no teor de ligante e comportamento mecânico de misturas asfálticas**. 1º Simpósio de Transportes do Paraná. 2º Seminários em Aeroportos e Transporte Aéreo. 2º Urbanidade, Curitiba, PR, 2018.

GONÇALVES, Ricardo Freire. **Proposta de ajuste nas energias de compactação para dosagem de misturas asfálticas com uso de compactador giratório em função da estrutura**

de pavimento tese. 2018. 477 f. Tese (Doutorado em Ciências- Engenharia Civil- Área Transportes), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2018.

GOUVEIA, Fernanda Pereira. **Estudo do efeito da adição de filer gesso nas propriedades dos ligantes asfálticos e concretos asfálticos.** 2013. 183 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

HINTZ, C. **Understanding mechanics leading to asphalt binder Fatigue.** Dissertation. University of Wisconsin – Madison. 2012.

HU, Guanhji; LI, Jianbing; ZEN, Guangming. Recent development in the treatment of oily sludge petroleum industry: A review. **Journal of Hazardous Materials.** 261. p. 470-290. 2013.

JÚNIOR, Irineu Petri. **Descontaminação de cascalhos de perfuração utilizando um secador micro-ondas semi-industrial em regime contínuo.** 2017. 176f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2017.

KODRAT, I.; SOHN, D.; HESP, S. Comparison of Polyphosphoric Acid– Modified Asphalt Binders with Straight and Polymer-Modified Materials. **Transportation Research Board**, v. 1998, p. 47–55, 2007.

LIMA, Fernanda Siqueira. **Tratamento de resíduo sólido de laboratório contendo zinco e cobre e simulação do processo de estabilização por solidificação.** 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2018.

LOPES, M. M. **Programa Inter laboratorial de Agregados e Misturas Asfálticas da REDE ASFALTO N/NE**. 2010. 176 fl. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2010.

LUCENA, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes; RODRIGUES, John Kennedy G.; FERREIRA, Heber Carlos; LUCENA, Lêda Christiane de Figueiredo Lopes. Caracterização térmica dos resíduos de perfuração “ONSHORE”. 4º PDPETRO, 21-24 de out. 2017, Campinas, SP.

LUCENA, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. **Utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de estradas**. 2008. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2008.

LUZ, Priscila Maria Sousa Gonçalves. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto**. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

MARQUES, Sheyla Karolina Justino. **Estudo da incorporação de cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo em formulações para tijolos de solo-cimento**. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2011.

MEDEIROS, Uíslei Araújo. **Viabilidade do uso de resíduos de borracha na pavimentação asfáltica**. 2019. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Bacharel em Ciências Militares, Resende, RJ, 2019.

MELO, Priscilla Marianne; Coriolano, Ana Catarina Fernandes; Araújo, Antônio Souza. Análise e proposta de destinação de resíduo de petróleo, borra oleosa e seu impacto no meio ambiente. **Educação Ambiental em Ação**. v. 11, n. 1, p.18-29, abr. 2013.

MENDES, Helena Carvalho. **Simulação da gaseificação de borra oleosa de petróleo em um reator de fluxo de arraste**. 2019. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2019.

MENDONÇA, A. M. G. D. **Contribuições ao estudo das propriedades de misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por adição de lignina**. 2020. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil 2020.

MORAES, Mariana Almeida de. **Estudo geoquímico, ecotoxicológico e ecológico do sedimento nas proximidades de um poço de perfuração na Bacia de Campos, Rio de Janeiro, Brasil**. 2010. 158f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

MOTA, Ana Carolina Silva. **Propriedades dielétricas e cinética de secagem de cascalhos de perfuração de poços de petróleo**. 2018. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2018.

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

NETO, José Bezerra de Almeida. **Aproveitamento do Cascalho de Perfuração de Poços para Elaboração de Pasta de Cimentação Primária.** 2017. 139 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2017.

NETO, Valter Ferreira de Sousa. **Avaliação reológica do ligante asfáltico modificado com nanopartículas de óxido de zinco.** 2019. 117 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2019.

NCHRP Project 09-33 “Performance Testing Recommendations,” 132–134.

NUÑEZ, J. Y. M.; DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Susceptibility and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. **Crostruction and Building Materials**, v. 73, p. 509-514, 2014.

OLIVEIRA, Bruno Manuel da Silva. **Influência do filer e da borracha no comportamento do mástique asfáltico.** 2015. 101 p. Dissertação de Mestrado (Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Portugal, 2015.

PEREIRA, Marina Seixas. **Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás.** 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2010.

PRUDENTE, Carolina Queiroz Arantes. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a quente utilizadas em Goiás**. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos**, 3. Ed. São Paulo, SP, 2006.

PORTO, Tassila Ramos. **Utilização do óxido de ferro em misturas asfálticas objetivando reduzir os efeitos das ilhas de calor urbano**. 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2019.

PORTO, Thalita Maria Ramos. **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperatura de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2018.

RANGEL, Neander da Silva. **Gerenciamento de Resíduos da perfuração de poços de petróleo e gás OFFSHORE: fluidos e cascalhos de perfuração**. 2015. 62 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Campo SMS) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2015.

RIMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de impacto ambiental – RIMA: atividade de perfuração marítima blocos BM-POT-16 e BM-POT-17 Bacia Potiguar**. Brasil, 2010. 41p.

RODRIGUES, Ana Luiza Rezende. **Efeito do tipo e da proporção de fíler no comportamento do mástique asfáltico.** 2019. 9 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SANTOS, Cláudio Batista. **Utilização de Resíduos Oleosos Provenientes das Atividade de Exploração e Produção de Petróleo para Aplicação em Camadas Estabilizadas de Bases e Sub-bases de Pavimentos Rodoviários.** 153f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

SILVA, Arthur César Mendes. **Avaliação de técnicas analíticas na determinação de contaminantes orgânicos em cascalhos de perfuração.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2018.

SILVA, Daniel Nobre Nunes. **Estudo da Extração Sólido-Líquido para tratamento de cascalho de perfuração usando microemulsão.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2019.

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água.** Dissertação (Mestrado em Ciências na área de tecnologia nuclear - Materiais). Autarquia Associada a Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, Rodolfo Gonçalves de Oliveira. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro.** 2010. 151f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SIMIÃO, Juliana. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais em uma empresa de usinagem sobre o enfoque da produção mais limpa.** 2011. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SKAF, Paulo; AURICCHIO, Carlos Eduardo Pedrosa; CAVALIERI, Newton José Soares.

PAVIMENTO DE VIAS NO BRASIL: infraestrutura de transportes terrestres rodoviários e cadeias produtivas da pavimentação. Disponível em: <https://sitefiespstorage.blob.core.windows.net/observatoriodaconstrucao/2016/05/Deconcic-Pavimento-de-Vias-no-Brasil-2017.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2020.

SOUSA, Cacilda Alves; MENDES, Franklin Silva. Coprocessamento em fornos de clínquer: uma alternativa sustentável para destinação do resíduo cascalho de perfuração de poços de petróleo em Mossoró-RN. **RUnPETRO**. ano.1, n. 1, p.17-23, abr. 2013.

SOUZA, Rayanderson Saraiva. **Avaliação da incorporação de cascalho de perfuração de poços de petróleo na fabricação de blocos de solo-cimento.** 19f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

STEINER, Luiz Renato. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício suplementar.** 128f. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, 2014.

SCHEFFER, Carlos Alexandre. **Influência da adição de resíduo do polimento de porcelanato nas propriedades de misturas asfálticas densas.** 24f. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, 2017.

VIOTTI, Marcela Aguiar Portugal; COSTA, Thiago Fonseca; AMARAL, Willen Docek Mote; RODRIGUES, Denise Celeste Godoy de Andrade. Biorremediação de solo contaminado por óleo lubrificante usado em biopilha de bancada. **Cadernos UniFOA**. Volta Redonda, n.34, p.5-14, ago. 2017.

XAVIER, Marioleide de Farias. **Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas**. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

