



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN

Unidade Acadêmica de Engenharia Civil - UAEC

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA

Área de Concentração: Geotécnica

PAULO ROBERTO BARRETO TORRES

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MODIFICADAS COM A
ADIÇÃO DE ÓLEO VEGETAL RESIDUAL**

Campina Grande – PB

2020

PAULO ROBERTO BARRETO TORRES

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MODIFICADAS COM A
ADIÇÃO DE ÓLEO VEGETAL RESIDUAL**

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

Área de concentração: Geotécnica

Orientador: D. Sc. Adriano Elísio Lopes Lucena

Campina Grande – PB

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

AUTOR: PAULO ROBERTO BARRETO TORRES

TÍTULO: ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MODIFICADAS COM
A ADIÇÃO DE ÓLEO VEGETAL RESIDUAL

Área de Concentração: Geotécnica

Dissertação defendida em: 23/12/2020

Dissertação aprovada em: 23/12/2020

Pela Banca Examinadora:

Adriano Elísio de F. S. Lucena

Prof. D. Sc. Adriano Elísio Lopes Lucena (Orientador)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Lêda Christiane Lucena

Prof. D. Sc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena (Examinadora Interna)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Deividi da Silva Pereira

Prof. D. Sc. Deividi da Silva Pereira (Examinador Externo)

Universidade Federal de Santa Maria

Campina Grande – PB

2020

T689e Torres, Paulo Roberto Barreto.
Estudo de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual / Paulo Roberto Barreto Torres. - Campina Grande, 2021.
109 f. : il. Color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.
"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena".
Referências.

1. Material Fresado. 2. Agente Rejuvenescedor. 3. Planejamento Fatorial. 4. Óleo Vegetal. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 693.7(043)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às três mulheres da minha vida.

À minha mãe, Socorro, por todo amor e por sempre me incentivar.

À minha avó, Zélia, por todo carinho e apoio imensurável durante toda minha vida.

À Isis, meu amor e companheira de vida, a quem tenho grande admiração.

Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos em minha vida. Sem Ti, eu nada seria.

À minha mãe, Socorro, por todo amor, dedicação e doação com seus filhos, e por ser minha grande incentivadora para que eu me tornasse Mestre. Obrigado por tudo mãe.

Aos meus avós, Antônio (*in memorian*) e Zélia, por serem modelos de amor, respeito e nunca terem medido esforços com minha criação. Obrigado por tanto amor.

Aos meus tios/pais, Tobias e Antônio, exemplos de caráter, honestidade e de vida. Obrigado por todo apoio e orientações ao longo minha vida.

À Isis, minha amiga, companheira, cúmplice e namorada, por tanto amor, incentivo, acreditar sempre em mim e estar sempre ao meu lado. Obrigado também por toda sua família e amigos, que hoje também são meus. Amo você!

Ao meu orientador, Professor Adriano, a quem tenho grande carinho e admiração desde minha graduação. Obrigado por todas orportunidades, e toda sabedoria e paciência ao transmitir seus ensinamentos.

Aos irmãos e amigos de longas datas, Pedro, Diego, André, Rodolpho, Ronaldo e à família que a UFCG e o LEP me deram, Priscila, Talita, Christian, Daniel, Conrado, Paulo, Thamires, Jeovanesa, Kevlemn, Diego, Pedro, Jonny e tantos outros. Obrigado por todos momentos, por todo apoio e ajuda.

Aos professores Isabelle Marie, Kennedy, Lêda, Verushcka, e muitos outros, pelos ensinamentos, incentivo e boa convivência sempre.

Aos técnicos do LEP, Jadilson, Arthur e Ildinho, e aos alunos Marcela e Lucas por estarem sempre disponíveis à ajudar e auxiliar nos ensaios, além da amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), e as duas coordenadoras Yana e Lêda, pelas oportunidades e disponibilidades.

Às empresas nas quais forneceram os materiais utilizados na pesquisa.

Ao CAPES pela bolsa concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

À todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

Os resíduos industriais quando descartados de maneira inapropriada podem proporcionar danos irreversíveis ao meio ambiente e até a comunidade de maneira geral. No setor da pavimentação, merece destaque o processo de reciclagem de pavimentos, onde o material fresado é reaproveitado em misturas asfálticas novas. No entanto, existem preocupações de que esse procedimento pode produzir misturas com elevada rigidez, pouca trabalhabilidade e performance em campo comprometida. Para otimizar e diminuir as desvantagens dessa técnica são utilizados agentes rejuvenescedores, entre eles o óleo vegetal residual que com o aumento da busca por tecnologias mais sustentáveis se torna muito promissor devido sua boa estabilidade oxidativa, tendência de redução de viscosidade dos ligantes, diminuindo os custos e melhorando a trabalhabilidade da mistura. O objetivo dessa pesquisa é analisar o comportamento de misturas asfálticas com o uso de material fresado e de ligante modificado com óleo vegetal residual não segregado, no qual tem maior aplicação prática. Para isso foram realizados ensaios físicos, químicos e reológicos nos ligante com e sem o aditivo e para as misturas asfálticas foi feito um planejamento fatorial para estudar a influência do material fresado e do óleo nos ensaios de: Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Lottman modificado, Flow Number e Módulo Dinâmico. Os resultados indicaram que com o acréscimo do óleo vegetal residual foi obtida uma redução na viscosidade, e consequente, redução das temperaturas de usinagem e compactação. Com o planejamento fatorial foi possível encontrar um indicativo das variáveis analisadas, principalmente no ensaio de resistência à tração, onde nas misturas asfálticas foi verificado que a variável que mais influenciou os resultados foi o teor de óleo, com exceção do ensaio de Lottman modificado onde o teor de material fresado foi mais significativo. Foi observado uma redução bastante significativa na utilização de agregados virgens para a mistura com 60% de material fresado e uma redução de 1,2% de ligante asfáltico virgem comparada com a mistura sem este material, podendo ser um forte indicativo de uma possível economia na fabricação desta mistura. De maneira geral, foi possível concluir que o incremento dessas variáveis foi viável e promissor do ponto de vista técnico, em relação a amostra de referência, e também do ponto de vista ambiental tendo em vista os problemas que o descarte inapropriado pode proporcionar ao meio ambiente.

Palavras-chave: Material Fresado, Agente Rejuvenecedor, Planejamento Fatorial, Óleo Vegetal

ABSTRACT

Industrial waste when inappropriately disposed of can cause irreversible damage to the environment and even to the community in general. In the paving sector, it is worth mentioning the pavement recycling process, where the milled material is reused in new asphalt mixtures. However, there are concerns that this procedure may produce mixtures with high rigidity, lower workability, and compromised field performance. To optimize and reduce the disadvantages of this technique, rejuvenating agents are used, among them the residual vegetable oil, which with the increase in the search for more sustainable technologies, becomes very promising due to its good oxidative stability, tendency to reduce the binders' viscosity, reducing costs and improving the workability of the mixture. The objective of this research is to analyze the asphalt mixtures behavior with the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) modified with non-segregated residual vegetable oil, which has greater practical application. For this, physical, chemical, and rheological tests were carried out on the asphalt binders with and without the additive, and for the asphalt mixtures, the technique of factorial planning was made to study the influence of the RAP and the oil in the tests of Indirect Tensile Strength (ITS), Resilient Modulus, Lottman modified, Flow Number and Dynamic Modulus. The results indicated that with the residual vegetable oil addition, a reduction in viscosity was obtained, and consequently, a reduction in mixing and compaction temperatures. With the factorial planning, it was possible to find an indication of the variables analyzed, mainly in the Indirect Tensile Strength test (ITS), wherein, it was verified that the variable that most influenced the results was the oil content, except for the modified Lottman test where the RAP content was more significant. A very significant reduction of virgin aggregates was observed for the mixture with 60% RAP, and a 1.2% reduction of virgin asphalt binder compared with the mixture without this material, which can be a strong indication of a possible economy in this mixture manufacture. In general, it was possible to conclude that the addition of these variables was feasible and promising from a technical point of view, concerning the reference sample, and also from an environmental point of view given the problems that inappropriate disposal can provide to the environment.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement, Rejuvenating Agent, Factorial Planning, Vegetable Oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Usina Drum-Mixer	30
Figura 2 - Comparação da temperatura de aquecimento de mistura em tambor secador de contrafluxo convencional versus tambor de barril duplo	32
Figura 3 - Processo de envelhecimento do ligante asfáltico	34
Figura 4 - Efeito do RejuvaSeal na viscosidade do ligante asfáltico	42
Figura 5 - Módulo complexo das misturas analisadas	46
Figura 6 - Ângulo de fase das amostras estudadas.....	47
Figura 7 - Resultados do ensaio do FTIR para as amostras estudadas.....	47
Figura 8 - Variação do índice de envelhecimento dos diferentes ligantes.....	48
Figura 9 - Representação de um experimento.....	49
Figura 10 - Exemplo de superfície de resposta para delineamento composto central	52
Figura 11 - Agregados graúdos	53
Figura 12 - Agregados miúdos.....	54
Figura 13 - Material fresado.....	54
Figura 14 - Óleo vegetal residual	55
Figura 15 - Etapas da pesquisa.....	56
Figura 16 – Distribuição granulométrica dos grãos	57
Figura 17 - Metodologia da dosagem SUPERPAVE.....	63
Figura 18 - Curva de Fuller da mistura MF0	64
Figura 19 - Curva de Fuller da mistura MF30	64
Figura 20 - Curva de Fuller da mistura MF60	65
Figura 21 - Determinação do teor de projeto da mistura MF60.....	66
Figura 22 - Variação de massa após RTFOT	67
Figura 23 - Ensaio de Penetração.....	68
Figura 24 - Ensaio de Ponto de Amolecimento	69
Figura 25 - Índice de Susceptibilidade Térmica	70
Figura 26 – Viscosidade rotacional antes RTFOT.....	71
Figura 27 – Viscosidade rotacional após RFTOT.....	71
Figura 28 - Performance grade.....	73
Figura 29 - Compliância não recuperável - Jnr	74
Figura 30 - Jnr, diff	75
Figura 31 - Porcentagem de recuperação	76
Figura 32 - Parâmetros A e B.....	77
Figura 33 – Estimativa da vida de fadiga para os ligantes puro e modificados	78
Figura 34 - Curvas de tensão deformação.....	79
Figura 35 - Espectros de FTIR para as amostras de ligantes asfálticos	80
Figura 36 - Espectro com faixa reduzida para as amostras de ligantes asfálticos.....	82
Figura 37 - Diagrama de Pareto para Resistência à Tração	83
Figura 38 - Superfície de resposta da Resistência à Tração.....	84
Figura 39 - Curvas de nível para RT.....	85
Figura 40 - Diagrama de Pareto para o Módulo de Resiliência	86
Figura 41 - Superfície de resposta do Módulo de Resiliência (NBR 16018).....	87
Figura 42 - Curvas de nível das variáveis Teor de óleo vegetal residual (%) e material fresado (%) para MR (NBR 16018).....	89
Figura 43 - Diagrama de Pareto para Lottman Modificado	90

Figura 44 - Superfície de Reposta para Lottman	91
Figura 45 - Curvas de Nível para Lottman Modificado	92
Figura 46 - Diagrama de Pareto para o Flow Number	93
Figura 47 - Superfície de resposta para Flow Number	94
Figura 48 - Curvas de nível para Flow Number.....	95
Figura 49 - Curvas mestras das amostradas estudadas.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas de usinagem para uso dos agregados do material fresado.....	31
Tabela 2 - Especificação de ARs.....	39
Tabela 3 - Especificações dos AREs.....	40
Tabela 4 - Propriedades básicas dos agentes rejuvenescedores.....	44
Tabela 5 - Matriz das misturas asfálticas estudadas.....	45
Tabela 6 - Quantidade passante acumulada dos materiais utilizados.....	57
Tabela 7 - Caracterização física dos agregados graúdos.....	58
Tabela 8 - Caracterização física dos agregados miúdos.....	58
Tabela 9 - Caracterização física e reológica do ligante asfáltico puro.....	59
Tabela 10 - Condições experimentais para as variáveis e níveis propostos.....	62
Tabela 11 - Matriz de ensaio corrido.....	62
Tabela 12 - Proporções dos agregados nas composições granulométricas (%).....	64
Tabela 13 - Resumo da compactação das misturas asfálticas.....	65
Tabela 14 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante da mistura MF60.....	65
Tabela 15 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de ligante da mistura MF60.....	66
Tabela 16 - Penetração Retida.....	68
Tabela 17 - Aumento de temperatura após o RTFOT.....	70
Tabela 18 - Temperaturas de usinagem e compactação.....	72
Tabela 19 - Classificação de volume de tráfego baseado no valor de Jnr à 3200 Pa.....	75
Tabela 20 - Valores estimados para vida de fadiga dos ligantes puro e modificados.....	78
Tabela 21 - Resultados dos ensaios mecânicos na matriz de ensaios do planejamento fatorial.....	82
Tabela 22 - ANOVA Resistência à Tração.....	84
Tabela 23 - ANOVA Módulo de Resiliência.....	87
Tabela 24 - ANOVA Lottman Modificado.....	90
Tabela 25 - Valores da ANOVA para o Flow Number.....	93
Tabela 26 - Valores mínimos de Flow Number para diferentes níveis de tráfegos.....	94
Tabela 27 - Resultado dos ensaios e parâmetros reológicos empíricos com o CAP 50/70 puro e modificado com o óleo vegetal residual.....	97
Tabela 28 - Comparação dos ensaios e parâmetros reológicos fundamentais com o CAP 50/70 puro e modificado com o óleo vegetal residual.....	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos de reabilitação de pavimentos asfálticos	23
Quadro 2 - Tipos de agentes rejuvenescedores	36
Quadro 3 - Ensaios realizados nos agregados e suas especificações	56
Quadro 4 - Ensaios físicos e reológicos realizados nos ligantes asfálticos e suas especificações	58
Quadro 5 - Ensaios mecânicos e suas especificações	66

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

°C	Celsius
%	Porcentagem
AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância Multifatorial
AR	Agente rejuvenescedor
ARE	Agentes de Reciclagem Emulsionados
ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Association
ASTM	American Society for Testing Materials
CAI	Índice de Envelhecimento químico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CIR	Cold-in-place recycling
Cm	Centímetro
cSt	CentiStokes
DCC	Delineamento Composto Central
DNC	Departamento Nacional de Combustíveis
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
FAA	Federal Aviation Administration
FDR	Full depth reclamation
FTIR	Fourier Transform Infrared
g/cm ²	grama por centímetro ao quadrado
Gmm	Densidade Máxima Medida
HIR	Hot-in-place recycling
INIR	Instituto de Infraestruturas Rodoviárias
l/m ²	litro por metro quadrado
IA	Índice de Envelhecimento
IST	Índice de Suceptibilidade Térmica
LAS	Linear Amplitude Sweep
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
m/min	metro por minuto
Máx	Máximo
MD	Módulo Dinâmico
Mín	Mínimo
Mm	Milímetro
mm ² /s	mílimetro ao quadrado por segundo
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	Multiple Stress Creep and Recovery
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NCAT	National Center for Asphalt Technology
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PA	Ponto de Amolecimento
PAV	Pressure Aging Vessel
Pa.s	Pascal segundo

PRI	Pavement Rejuvenation International
PG	Performance Grade
pol"	Polegada
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RT	Resistência à Tração
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
Seg	Segundo
SR	Superfície de Resposta
TC	Temperatura de Compactação
TU	Temperatura de Usinagem
VAM	Vazios no Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios
WMA	Warm Mix Asphalt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO-----	17
1.1	Objetivos-----	19
1.1.1	Objetivo geral-----	19
1.1.2	Objetivos específicos-----	19
1.2	Justificativa-----	19
1.3	Organização do trabalho-----	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA-----	22
2.1	Misturas asfálticas recicladas-----	22
2.1.1	Material fresado-----	25
2.1.2	Reciclagem a Quente ou Morna de Misturas Asfálticas-----	28
2.2	Agentes rejuvenescedores-----	37
2.2.1	Agentes rejuvenescedores a quente (AR)-----	38
2.2.2	Agentes rejuvenescedores a frio-----	39
2.2.3	Agente rejuvenescedor a base de alcatrão-----	40
2.3	Óleo vegetal como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas-----	42
2.3.1	Pesquisas com misturas asfálticas recicladas com óleos-----	44
2.4	Planejamento fatorial-----	48
2.5	Considerações finais-----	52
3	MATERIAS E MÉTODOS-----	53
3.1	Materiais-----	53
3.1.1	Ligante Asfáltico-----	53
3.1.2	Agregado graúdo-----	53
3.1.3	Agregados miúdos-----	53
3.1.4	Fíler-----	54
3.1.5	Material fresado-----	54
3.1.6	Óleo vegetal residual-----	55
3.2	Métodos-----	55
3.2.1	Propriedades físicas e reológicas e dos materiais-----	56
3.2.2	Propriedades químicas do ligante asfáltico e óleo vegetal residual-----	60
3.2.3	Planejamento experimental fatorial-----	61
3.2.4	Dosagem SUPERPAVE-----	62
3.2.5	Propriedades mecânicas das misturas asfálticas-----	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES-----	67
4.1	Propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticos-----	67
4.2	Variação de massa-----	67

4.2.1	Ensaio de Penetração -----	67
4.2.2	Ensaio de Ponto de amolecimento -----	69
4.2.3	Ensaio de Viscosidade Rotacional -----	70
4.2.4	<i>Performance Grade</i> -----	72
4.2.5	MSCR -----	74
4.2.6	LAS -----	76
4.3	Propriedades químicas dos ligantes asfálticos -----	80
4.4	Propriedades mecânicas -----	82
4.4.1	Resistência à Tração -----	83
4.4.2	Módulo de resiliência -----	86
4.4.3	Lottman modificado -----	89
4.4.4	Flow Number -----	92
4.4.5	Módulo Dinâmico -----	96
4.5	Tabelas com resumo dos resultados -----	97
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES -----	99
5.1	Conclusões -----	99
5.2	Sugestões para Pesquisas Futuras -----	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	101

1 INTRODUÇÃO

O sistema rodoviário é mais utilizado em toda a extensão territorial do Brasil e com isso fica evidente a necessidade de investimentos para a criação de novas rodovias, juntamente com a manutenção das já existentes. A estrutura do pavimento é construída com o objetivo de resistir e distribuir os esforços verticais e horizontais provocados pelo tráfego, clima e proporcionar aos usuários uma superfície de rolamento com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008). Além desses pontos, atualmente, existe uma preocupação crescente com o meio ambiente e conseqüentemente aumentam as buscas por um pavimento durável e sustentável.

O ciclo de vida do pavimento tem início na etapa de produção de materiais, projeto, elaboração, construção, restauração/manutenção, até o despejo final dos resíduos ao final desse ciclo de vida útil. Dessa maneira, com a restauração e manutenção surge a reciclagem dos pavimentos sendo possível começar um novo ciclo de reuso desses materiais, minimizar a quantidade de insumos virgens e aprimorar a utilização dos recursos naturais, reduzindo os impactos causados tanto pela construção como pela reabilitação das rodovias (HANSE & COPELAND, 2017).

O processo de reciclagem de pavimentos existe há anos, mas a técnica só se tornou mais difundida a partir no final da década de 1970. Juntamente com esse aumento da utilização dessa tecnologia e, conseqüente, aumento da parcela de material fresado, foi necessário o desenvolvimento de procedimentos que pudessem reutilizar esse material, pois a simples estocagem iria provocar custos financeiros elevados e provocar vários danos ao meio ambiente com o descarte desse material (PRADYUMNA *et al.*, 2013).

Atualmente, o destaque da indústria tem sido adicionar o maior número de material fresado chamado de *Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP, nas misturas asfálticas novas (BOHN, 2019). No entanto, a quantidade de RAP nos projetos de misturas asfálticas não tem ultrapassado os 20 ou 25%. Uma das razões para isso é a preocupação de que o material fresado possui ligante asfáltico envelhecido e sua adição em altas quantidades podem criar misturas com alta rigidez. Em conseqüência, essas misturas podem apresentar uma redução na trabalhabilidade e a sua performance em campo pode ser comprometida (AL-QADI *et al.*, 2012).

Além do mais, alguns pontos durante a elaboração da mistura pode afetar o nível de interação entre os ligantes envelhecido e virgem e, conseqüentemente, as características da mistura asfáltica final como: a origem do RAP; o ligante asfáltico novo a ser incorporado; o tipo de usina; e a temperatura de usinagem (SABOURI *et al.*, 2015).

Como uma alternativa para otimizar os efeitos positivos do uso de RAP e diminuir seus pontos negativos são utilizados agentes rejuvenescedores com o objetivo de recuperar as propriedades essenciais do ligante asfáltico envelhecido. Existem vários agentes rejuvenescedores disponíveis no mercado, mas com o aumento da busca por tecnologias mais sustentáveis, pesquisas (PORTUGAL *et al.*, 2017; LUCENA, *et al.*, 2018; LUZ *et al.*, 2019) foram realizadas com o uso de resíduos óleos vegetais na modificação de ligantes asfálticos. Os óleos vegetais são ricos em ácidos graxos insaturados e também possuem uma melhor resistência à temperatura, podendo ser utilizados também para a recuperação de ligantes asfálticos envelhecidos (JI *et al.*, 2017).

O óleo de cozinha residual quando descartados de maneira inadequada, é um potencial poluidor ao meio ambiente, podendo causar a impermeabilização e poluição do solo, contaminação do lençol freático, como também danificação da tubulação (CORRÊA, *et al.*, 2018). Além disso, segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, um litro de óleo de cozinha pode contaminar 25 mil litros de água, podendo causar um descontrole do oxigênio e a morte de peixes e outras espécies. Evidenciando a impotência de uma destinação correta deste resíduo.

De acordo com Oliveira *et al.* (2014), o óleo de cozinha residual pode ser utilizado para diversos fins, tais como fabricação de ração animal, de sabões, de biodiesel, de tintas e de vernizes. A utilização do óleo vegetal residual coletado, de estabelecimentos comerciais e/ou residenciais, seja para utilização na pavimentação ou qualquer outra finalidade, tem maior potencial de aplicação prática por não necessitar de segregá-los ou classificá-los como sendo específicos de uma só fonte vegetal, podendo ser de soja, milho, canola, etc.

De acordo com Luz *et al.* (2019), a aplicação dos óleos residuais na modificação de ligantes asfálticos é uma alternativa ecologicamente correta, já que estes mostram boa estabilidade oxidativa, que tendem a diminuir a elevada viscosidade dos ligantes asfálticos, diminuindo os gastos na usina, além de elevar a estabilidade à estocagem e adesividade nas misturas com os agregados.

O óleo vegetal residual possui um ponto de fulgor superior a 220°C e, assim, atua em favor da segurança quanto ao aquecimento dos ligantes asfálticos, nos quais trabalham a temperaturas máximas de 180°C em misturas asfálticas a quente. Além disso, outro fator positivo é que o óleo vegetal residual, quando for aquecido novamente, não irá possuir elementos voláteis como gases tóxicos, porque ele já sofreu o processo de cocção em altas temperaturas (CHEN *et al.*, 2014). Portanto, essa pesquisa busca estudar misturas asfálticas

recicladas e para otimizar o uso desse material e melhorar a sua trabalhabilidade será incorporado resíduo de óleo vegetal no ligante asfáltico em diferentes teores.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com ligante asfáltico modificado com óleo vegetal residual.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar as propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico convencional e modificado com o óleo vegetal residual;
- Avaliar o efeito do teor de material fresado e do teor de óleo vegetal residual nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas modificadas com esses materiais;
- Utilizar o planejamento fatorial para otimizar as variáveis estudadas, objetivando o melhor aproveitamento de ambos os resíduos sem prejudicar as propriedades mecânicas da mistura asfáltica;
- Propor uma destinação dos resíduos que seja ambientalmente e economicamente viáveis.

1.2 Justificativa

O grupo técnico rodoviário tem se engajado para encontrar novas tecnologias e criar novas soluções mais econômicas de manutenção dos pavimentos. Entre as técnicas analisadas merece destaque a reciclagem dos pavimentos asfálticos que além de possibilitar agilidade na execução e possuir preços competitivos, tem o aspecto ambiental envolvido (DELLABIANCA, 2014).

Dentre as vantagens ambientais da utilização de mistura asfáltica reciclada merecem destaque: a diminuição do uso de novos recursos naturais (ligante asfáltico, agregados minerais, etc), a redução das emissões de gases do efeito estufa e também, a redução da disposição de resíduos em aterros sanitários. Quando analisado o ponto de vista econômico, é possível diminuir os custos com a compra de novos produtos (ligante asfáltico virgem e agregados) e com transporte de materiais e *royalties*. Dessa maneira, a utilização de material fresado não é apenas uma opção benéfica para o meio ambiente, mas também pode garantir

competitividade econômica na construção e restauração de pavimentos asfálticos (SILVA, 2014).

De acordo com Bonfim & Domingues (1995) a reciclagem dos revestimentos asfálticos acontece no Brasil desde meados da década de 1980, sobretudo após a implementação de máquinas fresadoras no país. A reciclagem asfáltica reutiliza o material do revestimento asfáltico fresado, e em seguida, utiliza-o como revestimento ou *binder* por meio da adição de agentes rejuvenescedores que restauram as propriedades do ligante asfáltico original que foi envelhecido.

Esse procedimento de envelhecimento acontece devido à ação da temperatura, do ar, da luz solar, da chuva e do tempo, resultando em uma elevação da viscosidade do ligante e conseqüentemente aumento na rigidez da camada de revestimento. Este aumento da consistência do ligante juntamente com ação do tráfego, provoca o surgimento de fissuras e deterioração acentuada no pavimento (SILVA *et al.*, 2017). Assim como, pode proporcionar uma redução na trabalhabilidade da mistura quando for reciclado, podendo comprometer o seu desempenho em campo.

No entanto, as misturas asfálticas envelhecidas podem ser reparadas por meio da adição de produtos químicos, chamados de agentes rejuvenescedores que possuem o objetivo de restabelecer os grupos aromáticos e resinas para que as características iniciais do ligante sejam recuperadas. Com isso, existem esforços para o desenvolvimento sustentável de agentes rejuvenescedores com a intenção de minimizar os impactos ambientais sem que comprometa a qualidade, durabilidade, economia e segurança (SILVA, 2014).

Diante desse cenário, surgem pesquisas com a incorporação de óleos vegetais residuais no ligante asfáltico, sendo uma alternativa que contribuem para a conservação das propriedades originais, reduz a viscosidade e as temperaturas de usinagem e compactação, melhorando, conseqüentemente, sua trabalhabilidade (LUZ *et al.*, 2019). Essas vantagens são valorizadas ao utilizar o óleo vegetal residual como agente rejuvenescedor em misturas recicladas, já que a adição de grandes quantidades de material fresado pode produzir misturas demasiadamente rígidas, com reduzida trabalhabilidade e desempenho em campo comprometido (ALI *et al.*, 2016).

Diante desses fatos esta pesquisa foi idealizada e desenvolvida com a intenção de obter mais domínio e conhecimento das condições e taxas de aplicações das misturas asfálticas recicladas com óleo vegetal residual como agente rejuvenescedor. Desta maneira pode-se otimizar a reciclagem de materiais de revestimentos asfálticos deteriorados juntamente com a

reutilização do óleo vegetal, onde ambos os materiais seriam descartados no meio ambiente e provocariam um impacto ambiental negativo.

1.3 Organização do trabalho

Essa dissertação é composta por 5 capítulos, sendo apresentada a seguir uma breve descrição dos assuntos abordados em cada um deles.

- Capítulo 1 – composto por Introdução, Objetivos e Organização do trabalho;
- Capítulo 2 – compreende a Fundamentação Teórica, onde foram abordados assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: misturas asfálticas recicladas, agentes rejuvenescedores, óleo vegetal como agente rejuvenescedor, pesquisas com misturas asfálticas recicladas utilizando óleo e planejamento fatorial.
- Capítulo 3 – consiste na descrição dos métodos experimentais e/ou procedimentos de ensaios utilizados bem com os materiais e equipamentos necessários ao alcance dos objetivos da pesquisa;
- Capítulo 4 – são apresentados os resultados obtidos com as devidas análises realizadas durante a fase experimental;
- Capítulo 5 – são apresentadas as conclusões do trabalho com sugestões para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Misturas asfálticas recicladas

A reciclagem de pavimentos é definida como uma alternativa para algumas situações encontradas nos grandes centros urbanos, pois ao longo do tempo a estrutura do pavimento perde sua capacidade estrutural e/ou funcional devido à ação do tráfego e do clima, assim existe a necessidade de sua reabilitação (SUZUKI, 2019). As misturas recicladas possuem vários benefícios em comparação às misturas asfálticas convencionais. Entre as vantagens da reciclagem está a conservação de agregados, ligantes e de energia, assim como a preservação ambiental além da restauração das condições geométricas existentes e redução dos custos com implantação (DNIT, 2006).

A *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 1997) define várias metodologias de reabilitação e recuperação de misturas asfálticas:

- *Cold Plannig* – Fresagem com/sem recomposição: é definida pela remoção, controlada automaticamente, do revestimento asfáltico a uma determinada profundidade, com a recuperação da superfície a uma cota e inclinação estabelecida, sem afundamentos e imperfeições. A fresagem pode ser usada para regularização ou texturização do pavimento para erradicar o escorregamento e resgatar a resistência à derrapagem. O pavimento resultante pode ser diretamente liberado ao tráfego e seguidamente recapeado ou preparado como uma superfície de texturização.
- *Hot Reycling in asphalt plant* – Reciclagem a quente em usina: nessa metodologia a mistura asfáltica reciclada é combinada com agregados virgens e ligante asfáltico para confecção de novas misturas asfálticas quentes. O material fresado é comumente obtido por meio da fresagem dos pavimentos, assim como por meio da operação de trituração.
- *Hot-in-place recycling* (HIR) – Reciclagem a quente no local: esse procedimento é feito *in situ* com o pavimento original em uma profundidade de 2 a 4 centímetros. O revestimento asfáltico fresado é aquecido e amolecido de maneira a possibilitar que seja escarificado ou misturado por um rotativo a quente, a uma certa profundidade. Nesse método existe a necessidade de adição de novos materiais e/ou agente reciclador ou outro aditivo.
- *Cold-in-place recycling* (CIR) – Reciclagem a frio no local: é uma técnica que reutiliza materiais de pavimentos existentes. Toda a execução é feita ao mesmo

tempo que o pavimento é reciclado e, geralmente, não há necessidade de transporte de materiais, com exceção do aditivo que será utilizado. Em algumas situações, ocorre a adição de agregados novos ao material fresado para a melhoria das propriedades da mistura reciclada. Usualmente é utilizado emulsão de asfalto, no entanto também podem ser utilizados agentes rejuvenescedores.

- *Full depth reclamation* (FDR) – Recuperação profunda do pavimento: é uma metodologia de reciclagem em que toda a seção do revestimento asfáltico e uma parcela pré definida de material subjacente são melhorados com aditivos para reproduzir uma camada de base estabilizada. Em algumas situações, a quantidade de material para alcançar a espessura desejada da camada de base tratada não se encontra no local e há necessidade de novos materiais para aumento da espessura.

As cinco técnicas mostradas podem ser usadas em conjunto ou separadamente. Para a decisão do melhor método é preciso analisar: as condições locais e os defeitos presentes no pavimento atual; o reconhecimento das possíveis causas do defeito, fundamentadas em análises laboratoriais e de campo; as informações do projeto inicial e o histórico de execução e intervenções de manutenção; os custos (inicial e de conservação); o histórico de desempenho; as limitações em relação à geometria da via; as condições ambientais e o tráfego (ASPHALT INSTITUTE, 2007; DNIT, 2006). O Quadro 1 mostra a recomendação da ARRA (1997) para a seleção da técnica de reciclagem do pavimento asfáltico de acordo com os tipos de defeitos mostrados no pavimento atual.

Quadro 1 - Métodos de reabilitação de pavimentos asfálticos

Tipos de defeitos	Fresagem e recomposição	Reciclagem a quente em usina	Reciclagem a quente no local	Reciclagem a frio	Recuperação profunda
Defeitos superficiais					
Desagregação	X	X	X		
Exsudação	X	X	X		
Escorregamento	X	X	X		
Deformação					
Corrugação/ondulação	X	X	X		
Afundamento de trilha raso	X	X	X		
Afundamento de trilha profundo		X		X	X
Trincamento (associado ao carregamento)					
Jacaré		X		X	X
Longitudinal		X	X	X	X
Bordo		X		X	X
Derrapagem		X	X		
Trincamento (não associado ao carregamento)					
Bloco		X		X	X
Longitudinal		X	X		
Transversal (térmico)		X		X	X
Reflexão de trincas		X		X	X
Reparos de Manutenção					
Spray		X		X	X
Recapeamento		X		X	X
Buraco/Panela		X		X	X
Reparo profundo		X		X	X
Problemas de base/sub base					X
Irregularidade					
Generalizada	X	X	X		
Depressões locais	X	X	X		X

Fonte: Adaptado de ARRA, 1992.

As várias metodologias de reciclagem possuem diferentes benefícios em relação as metodologias convencionais de manutenção e reabilitação, e a escolha de uma determinada técnica deve ser fundamentada, sobretudo, no tipo de defeito encontrado no pavimento atual. No entanto, como pode ser mostrado no Quadro 1 a reciclagem a quente em usina é uma técnica que atende uma maior correção dos defeitos no pavimento. Por isso, o estudo desta técnica, bem como a avaliação de suas vantagens e desvantagens é fundamental para a obtenção do máximo de seus benefícios.

2.1.1 Material fresado

Como já mencionado anteriormente, a reciclagem de revestimentos asfálticos representa um processo pelo qual uma mistura asfáltica existente, comumente em situação deteriorada, é fresada e pode ser misturada com um novo ligante asfáltico e agregados virgens, proporcionando a sua reutilização (GASPAR *et al.*, 2019).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008) a fresagem é uma operação de corte por meio de um equipamento, fresadora, de uma camada ou todo o revestimento asfáltico em um trecho de via, ou também pode englobar outra camada do pavimento, como maneira de restauração da qualidade à pista de rolamento ou como forma de melhorar a capacidade de suporte.

O material oriundo desse processo de corte do revestimento asfáltico é denominado de RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement* – que em português é denominado de pavimento asfáltico recuperado (ZUBARAN, 2014). De acordo com a NCHRP (2001) o RAP é o antigo revestimento asfáltico que passa por um moinho, retirado da faixa de rolamento. O material fresado pode ser usado em novas misturas asfálticas gerando uma redução da quantidade de material novo que necessita ser acrescentado à mistura asfáltica, podendo gerar uma economia de dinheiro e recursos naturais. No entanto, há uma restrição para o ligante asfáltico, por conta do seu envelhecimento, que perde várias de suas características originais, resultantes dos processos de oxidação e volatilização, mas que podem ser reestabelecidas com uma combinação de ligante asfáltico novo ou com adição de um agente rejuvenescedor (DNIT, 2006).

De acordo com o INIR (2015) a reciclagem é uma alternativa de renovação de pavimentos desgastados. Este processo não se deve estar relacionado apenas ao cenário ecológico, pois ele é tecnicamente adequado e possui vantagens econômicas, tanto para as construtoras como para os órgãos administrativos da rodovia.

Segundo Specht *et al.* (2013) as principais vantagens do uso de material fresado são:

- Diminuição nos custos de construção;

- Conservação de agregados e ligantes asfálticos;
- Preservação da geometria do pavimento asfáltico atual;
- Manutenção da drenagem;
- Preservação do meio ambiente;
- Conservação de energia;
- Homogeneização estrutural;
- Readequação estrutural
- Rápida liberação da pista.

Ainda vale ressaltar que a grande importância da reciclagem está na situação de que todo o material retirado pelas fresadoras pode ser reutilizado, não armazenando resíduos sobre o meio ambiente. No entanto, para o DNIT (2006) a seleção da reciclagem irá depender de vários fatores como:

- Análise dos problemas do pavimento;
- Identificação dos motivos prováveis dos defeitos, fundamentado em pesquisas de laboratório e in situ;
- Informes de projetos e antecedentes das ações de conservação;
- Custos;
- Históricos da performance do pavimento;
- Limitações em relação à geometria horizontal e vertical da rodovia;
- Questões ambientais;
- Tráfego.

Atualmente, de acordo com Segundo *et al.* (2016) a fresagem de pavimentos asfálticos é uma metodologia aplicada de maneira constante como segmento do processo de reparação de pavimentos danificados. Essa técnica, ainda segundo o autor, busca resolver entraves tradicionalmente urbanos, com o objetivo de impedir problemas como: o alteamento de calçadas e de drenagem pluvial, além da redução da propagação de trincas por fadiga.

A fresagem teve início da década de 1970, motivada pela reduzida quantidade de materiais asfálticos disponíveis e pela crise econômica internacional da época. No Brasil, essa metodologia foi, primeiramente, usada nos anos de 1980 com uso de uma fresadora norte-americana na manutenção da Via Anchieta, no estado de São Paulo (BONFIM, 2011).

De acordo com Bonfim (2011) há três tipos de fresagem:

- Fresagem superficial: também chamada de fresagem de regularização seu principal objetivo é a reparação dos defeitos presente no revestimento asfáltico,

não existindo a necessidade do recapeamento da pista subsequente, pois a textura alcançada proporciona o rolamento assegurado, no entanto com pouco conforto.

- Fresagem rasa: esse tipo de técnica é principalmente utilizada nas camadas superiores dos pavimentos e em algumas situações pode alcançar à camada de ligação, com um corte intermediário em torno de 5 cm. Essa fresagem é muito usada na reparação de problemas funcionais e em correções superficiais.
- Fresagem profunda: nesse tipo de metodologia o corte alcança níveis relevantes e pode atingir até as camadas mais inferiores do pavimento, como a sub-base. É usada em reparações que tenham como objetivo a perspectiva estrutural, seja por reorganização da estrutura do pavimento ou pela adição dos materiais de revestimento à camada de base.

Segundo Ali *et al.* (2016) a fresagem possui vantagens como a funcionalidade e velocidade na execução dos serviços. Ela também permite a manutenção dos greides das pistas, impedindo que subam depois da aplicação de um novo revestimento. A fresagem também traz o benefício de ajudar na correção ou alteração da inclinação da pista, além da, nivelção dos tampões de ferro. Essa metodologia também é sinalizada como a melhor opção para reduzir o peso de estruturas que aguentaram constantes recapeamentos, como é o caso de pontes e viadutos.

Bonfim (2011) pesquisou sobre a composição granulométrica consequente do procedimento de fresagem de revestimentos asfálticos. Ele analisou dois trechos experimentais localizados na mesma pista, o primeiro encontrava-se mais degradado do que o outro, com trincas por fadiga. Essas áreas foram fresadas em três profundidades de corte diferentes – 3, 5 e 8 cm – concordadas com três velocidades de avanço da fresadora – 3, 6 e 10 m/min – para o posterior estudo da granulometria do material obtido. Também foram feitos testes com e sem a extração do ligante asfáltico.

Em relação as composições granulométricas encontradas no estudo, Bonfim (2011) conseguiu mostrar que a fresagem gera um deslocamento das curvas granulométricas quando comparada às curvas antes de processo. A granulometria alcançada com a extração de ligante asfáltico, quer dizer após a fresagem e sem grumos, são movidas para cima, gerando uma granulometria mais fina, pois os agregados têm os seus tamanhos máximos nominais reduzidos devido suas quebras durante o processo de fresagem. O contrário acontece com as curvas consequentes do material fresado que não foi realizada a extração de ligante asfáltico. Nessa situação, o material ainda possui os grumos e ocorre um aumento no tamanho máximo

nominal dos agregados, dessa maneira a percentagem de fresado passante em cada peneira é diminuído. Com a ausência de finos a curva resultante é abaixo da curva original e esse fato é acentuado com o acréscimo da velocidade de avanço da fresadora.

2.1.2 Reciclagem a Quente ou Morna de Misturas Asfálticas

Desde que a reciclagem passou a ser vista como uma opção viável para a recuperação de pavimentos, a alternativa mais possível para cada tipo de obra tem que ser determinada de acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006).

De acordo com *Asphalt Institute* (1986) a reciclagem a quente é a técnica em que o RAP é misturado com um novo ligante asfáltico, e/ou agente rejuvenescedor (AR) e/ou agregados novos, de acordo com a necessidade, para a elaboração de misturas asfálticas que atendam as especificações e normas do tipo de mistura formada. Esse procedimento começou na década de 1970, na Índia e Singapura, e tornou-se a principal técnica após a crise econômica da mesma década (VASCONCELOS & SOARES, 2003).

As normas que estabelecem as especificações da reciclagem no Brasil são: a DNIT - ES 033/2005 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico reciclado a quente na usina - e DNIT - ES 034/2005 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico reciclado a quente no local, respectivamente, especificações de serviço para concreto asfáltico reciclado a quente na usina ou no local (*in situ*). A mistura finalizada deve satisfazer as condições de misturas asfálticas que são designadas às camadas de base, “binder” ou de rolamento.

De acordo com a ARRA – *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (1997) a reciclagem a quente *in situ* constitui na técnica em que o pavimento original é aquecido e amolecido e, posteriormente, moído até alcançar uma profundidade específica. Além do mais, mostra como benefícios a extinção de fissuras na superfície, assim como conserto de afundamentos e rejuvenescimento de ligantes asfálticos envelhecidos. Nesse método, a pausa do tráfego é completamente eliminada e os custos são reduzidos.

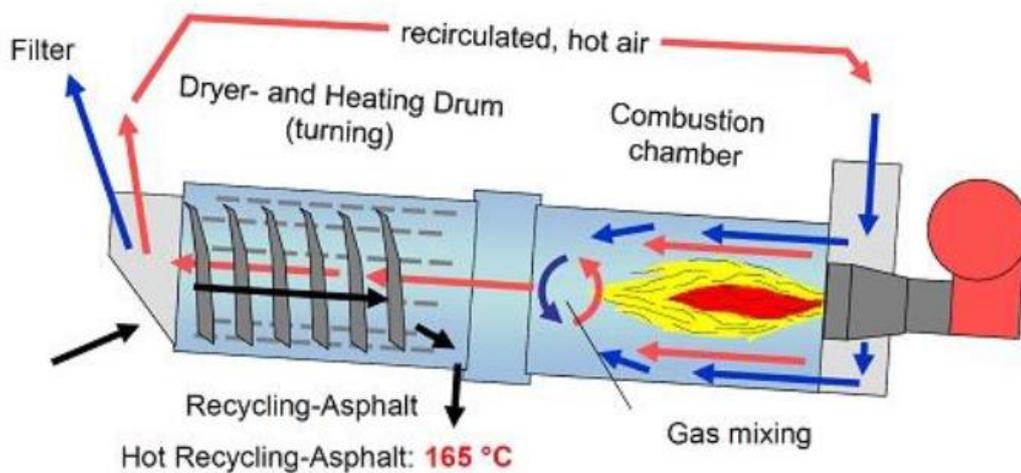
A reciclagem a quente realizada em usinas, pode ser feita tanto em usinas do tipo interrupto (centrais gravimétricas) ou nas usinas do tipo tambor-misturador (*drum-mixer*) e centrais volumétricas. As usinas mais utilizadas no procedimento de reciclagem são as do tipo tambor-misturador, no entanto elas passaram por adequações em comparação ao modelo tradicional com o objetivo que o RAP não tenha conexão direta com a chama durante o procedimento de secagem da amostra (SUZUKI, 2019).

A continuação de seguimento das misturas recicladas a quente em uma usina segue quatro etapas bem definidas segundo o DNIT (2006):

- Primeira etapa: organização do material, abrangendo a retirada do pavimento asfáltico original e posteriormente diminuição ou quebra do material até um tamanho apropriado; esse processo de redução pode ser realizado retirando-se a amostra da pista seguido do transporte para a usina; ou ainda a quebra do material com preparação adicional nas instalações de britagem, junto à usina;
- Segunda etapa: ponderação dos estoques, com o objetivo de avaliar as propriedades da amostra estocada, para análise de mistura reciclada;
- Terceira etapa: procedimento de usinagem à quente, com o objetivo de realizar algumas alterações nas usinas tradicionais, ou seja, o revestimento asfáltico retirado deve ser aquecido e seco, porém não pode ser submetido de forma direta à chama do secador; a submissão direta à chama pode proporcionar poluição do ar, assim como aumento do enrijecimento do ligante restante no revestimento retirado;
- Quarta etapa: espalhamento e compactação, a mistura será jogada e compactada como ligante asfáltico normal, utilizando os processos e equipamentos tradicionais.

Na Figura 1 é mostrado um tambor da empresa Amman, modelo RAH100, para confecção de misturas convencionais a quente, com o uso de material fresado. A usina utiliza um secador úmido que proporciona o aquecimento do material fresado sem toque direto na chama. Nessa técnica o cilindro é colocado na parte superior da torre, e constituído de dois tambores, onde o tambor exterior rotaciona em torno do tambor interior, e nele são aquecidos os materiais fresados. O RAP não entra em contato com a chama, pois é aquecido com uso de ar quente e descarregado antes do contato. Dessa maneira, é reduzida a emissão de gases assim como é prevenida um maior envelhecimento do ligante asfáltico presente na amostra fresada.

Figura 1 - Usina *Drum-Mixer*



Fonte: Suzuki, 2019

De acordo com Suzuki (2019) no decorrer do procedimento de usinagem, o material fresado pode ser aquecido utilizando, particularmente, dois métodos distintos: transferência de calor por condução ou convecção. A transição de calor por condução acontece quando dois materiais de temperaturas diferentes entram em contato. Esse método é em geral usado em grande parte das usinas gravimétricas, e quando o material fresado é adicionado em secadores contrafluxo. Dessa maneira, os agregados novos podem ser superaquecidos para transportar calor ao material fresado. A transferência de calor por convecção acontece quando uma partícula sólida é apresentada a uma corrente de gás quente. Os secadores convencionais de fluxo paralelo utilizam essa metodologia para secar o material fresado.

Outro ponto que deve ser considerado é a umidade do RAP, uma vez que quanto mais elevada for a umidade, maior precisará ser a temperatura de aquecimento dos agregados. A Tabela 1 apresenta as temperaturas necessárias dos agregados novos, levando em consideração vários níveis de umidade do material fresado, e a temperatura final da mistura em uma usina do tipo gravimétrica. Algumas temperaturas são demasiadamente altas para grandes quantidades de RAP e umidade, e dificilmente podem ser alcançadas na prática.

Tabela 1 - Temperaturas de usinagem para uso dos agregados do material fresado

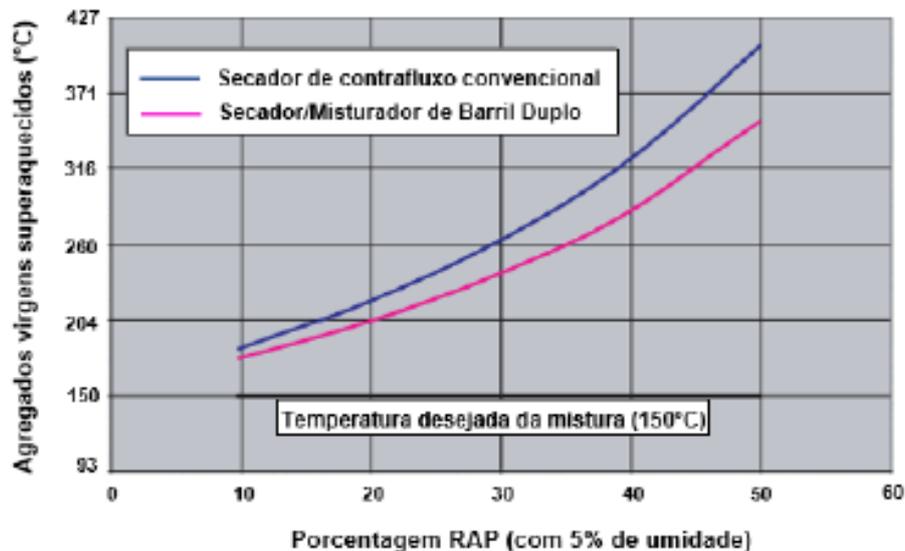
Teor de RAP (%)	Teor de umidade do RAP (%)	Temperatura de descarga da mistura reciclada (°C)			
		104	116	127	138
10	0	121	138	152	163
	1	127	143	154	168
	2	132	146	157	171
	3	138	149	163	174
	4	141	152	166	177
	5	143	157	168	182
20	0	138	154	168	182
	1	146	160	177	191
	2	154	168	182	196
	3	163	177	191	204
	4	171	185	199	213
	5	179	193	207	221
30	0	157	174	191	207
	1	168	185	202	218
	2	182	199	216	232
	3	196	213	229	246
	4	210	227	243	260
	5	224	241	257	274
40	0	179	199	218	238
	1	199	218	238	257
	2	218	238	257	277
	3	243	260	279	299
	4	260	279	299	321
	5	285	302	321	341
50	0	210	235	257	282
	1	241	268	288	310
	2	271	293	318	343
	3	302	327	349	374
	4	338	360	379	404
	5	366	391	413	438

Fonte: Young (1996)

Dessa maneira, a utilização de elevados teores de material fresado necessita de algumas modificações nas usinas. Ao usar equipamentos mais específicos como, por exemplo, um tambor secador/misturador de tambor duplo, menos superaquecimento é preciso. A Figura 2 apresenta a temperatura de aquecimento de um secador de contrafluxo convencional quando

é usado 50% de material fresado. Em confrontação, a imagem apresenta que um tambor de barril duplo precisa de uma temperatura inferior, em torno de 38°C para usinar uma amostra com a mesma quantidade de material fresado (BROCK & RICHMOND, 2007).

Figura 2 - Comparação da temperatura de aquecimento de mistura em tambor secador de contrafluxo convencional versus tambor de barril duplo



Fonte: BROCK & RICHMOND, 2007

No momento atual há tecnologias para a confecção de misturas utilizando até 100% de material fresado. No entanto, para reduzir a temperatura de usinagem necessárias nesses casos uma alternativa técnica que pode ser usada é o uso de misturas asfálticas mornas (Warm Mix Asphalt – WMA). De acordo Motta (2011) essa tecnologia foi elaborada com o objetivo de diminuir a temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas em aproximadamente 30°C a 50°C. Segundo Prowell *et al.* (2012) as misturas mornas trazem os benefícios de melhoramento na capacidade de compactação das misturas que possuem altos teores de RAP. Assim como, a redução dessas temperaturas provoca um menor envelhecimento do ligante asfáltico novo. Dessa maneira, o uso de quantidades grandes de material fresado na mistura asfáltico pode ser usado em conjunto com esta tecnologia e mostrar benefícios tanto em relação ao consumo energético como também pela necessidade de superaquecer os agregados novos que irão complementar a mistura final.

Genesseaux (2015) mostra que as misturas asfálticas recicladas com grande quantidade de material fresado juntamente com o uso da metodologia de misturas mornas, respondem aos índices de durabilidade especificados pelas normas. Entretanto, é importante ressaltar a necessidade da utilização de usinas adaptadas que entrevejam a entrada de RAP distante da chama do secador.

De acordo com Ali *et al.* (2016) alguns dos benefícios da reciclagem a quente ou morna em usina em comparação aos outros tipos de reciclagem são:

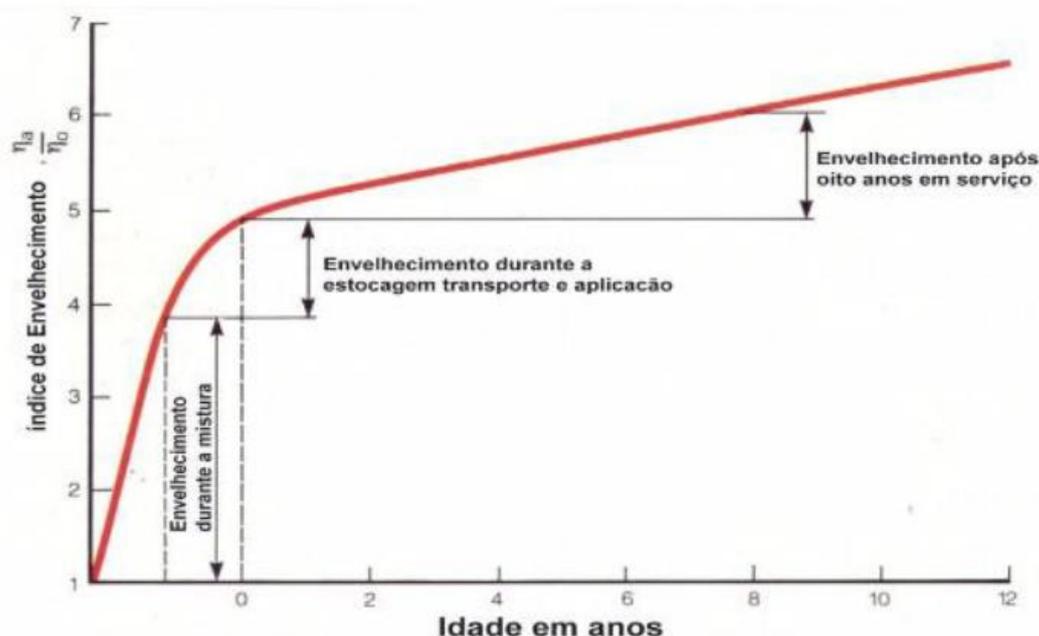
- A reciclagem, tanto dos agregados, como do ligante asfáltico restante no material fresado (produtor de maior custo em um revestimento asfáltico);
- A recuperação da espessura completa da camada de revestimento;
- o conserto de possíveis erros no processo de dosagem realizado no projeto piloto da mistura;
- a oportunidade de análise em laboratório dos insumos depois de sua retirada da camada original.

De maneira intuitiva, quanto maior a quantidade de material fresado na mistura, maiores seriam as vantagens econômicas e ambientais. Entretanto, a verificação das propriedades e performance das misturas recicladas é importante para que seja possível a produção de misturas com características parecidas ou superiores as convencionas. Além de que, há várias causas que limitam a quantidade de RAP na mistura final, como por exemplo, as propriedades do material fresado e o tipo de usina para a produção de mistura reciclada.

O envelhecimento e conseqüente enrijecimento do ligante asfáltico presente no RAP também é um obstáculo e necessário cuidado quanto ao manejo do material fresado de pavimento. O ligante endurecido possui uma resistência maior a deformação permanente, no entanto também aumenta sua susceptibilidade ao trincamento (BUDNY, 2012). Visualmente, o envelhecimento do ligante é percebido pela elevação da sua viscosidade, ponto de amolecimento, redução da penetração e perda de suas características aglutinantes. O ligante asfáltico após o envelhecimento também tem um aumento da fragilidade e redução da ductilidade (BOHN, 2017).

A Figura 3 mostra como o índice de envelhecimento é demonstrado pela relação $\frac{\eta_a}{\eta_o}$, onde η_a é a viscosidade em uma data de condição de envelhecimento e η_o mostra a viscosidade inicial do ligante. Na Figura 3 é possível perceber que o envelhecimento do ligante asfáltico ocorre em três etapas: a primeira acontece no período de usinagem da mistura asfáltico e é causadora de 60% do envelhecimento; a segunda parte acontece no período da estocagem, processo comumente empregado em usinas de grande porte, transporte, lançamento e compactação, sendo causadora de 20% do total do envelhecimento e a terceira parte acontece no período de vida útil do pavimento, por conta das ações do meio ambiente e é responsável pelos 20% restante do processo de envelhecimento (TONIAL, 2001).

Figura 3 - Processo de envelhecimento do ligante asfáltico



Fonte: Tonial, 2001

Outra desvantagem da reciclagem de misturas asfálticas é a heterogeneidade do RAP, pois para misturas com quantidades superiores a 20% é essencial verificar a homogeneidade do material usado além de diversos controles. Segundo Genesseeaux (2015) esses problemas de diversidade podem ser separados em três grupos:

- Heterogeneidade do material fresado;
- Nível da mistura entre o material fresados e os novos materiais em uma escala macroscópica;
- Nível dessa mistura em escala microscópica, pois esta pode não acontecer se o ligante asfáltico do material fresado não tiver sido remobilizado.

O ligante asfáltico presente em uma mistura é separado entre os grãos segundo a superfície específica dos agregados. Dessa maneira, a parte fina da mistura possui uma maior quantidade de ligante do que a parte mais grossa, por conta da maior superfície específica presente na parte fina (GENNESSEAU, 2015). Assim, os equívocos nas amostras do material fresado estão relacionados não apenas ao esqueleto pétreo da mistura reciclada final, mas também a quantidade de ligante asfáltico presente inicialmente. Por isso, o destorroamento e a divisão do material fresado podem gerar um controle maior na dosagem da mistura reciclada.

Para Valdés *et al.* (2011) a utilização de uma quantidade de 60% de material fresado no preparo de misturas é viável do ponto de vista técnico. No entanto, é fundamental analisar

e manejar todo o RAP de maneira adequada a fim de evitar misturas muito diversificadas. O estudo de amostras de material fresado mostra variabilidade na quantidade de teor e no estudo da granulometria. Dessa forma, usar RAP depois de peneiramento em diversas frações e usar a maior quantidade de frações finais do material fresado resulta em uma menor diversidade.

Além da heterogeneidade, o aquecimento do material fresado, em misturas asfálticas com quantidade de RAP superior a 25% também é uma das limitações da utilização das misturas recicladas. No processo da reciclagem, quando o material fresado é adicionado em teores reduzidos o aquecimento acontece por transferência de calor do agregado virgem para o RAP. Quando o teor adicionado é elevado, esse processo é inviável do ponto de vista energético, pois é necessário superaquecer o agregado virgem (acima de 250°C ou até 300°C) (GENNESSEAU, 2015). Além de que este superaquecimento pode levar alguns agregados, de origem calcária, por exemplo, à degradação (BROSSEAUD, 2011).

As temperaturas de aquecimento dos materiais da mistura necessitam de ajustes nas usinas, de maneira a elevar a produção e diminuir o envelhecimento do ligante durante o processo de usinagem. As mudanças a serem realizadas podem acontecer a partir da construção de usinas *Drum-Mixer*, do tipo contrafluxo ou por meio do aquecimento do RAP por microondas, ou também, pela divisão do RAP em segmentos, para aumento do controle da granulometria e do aquecimento seletivo desse material (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Países como Estados Unidos e Alemanha, já utilizam grandes quantidades de RAP na construção de novos pavimentos. Os órgãos brasileiros devem impor quantidades mínimas de RAP para serem reutilizados em novas misturas asfálticas, e dar incentivos para os empreiteiros adaptarem suas usinas para reaproveitar esse material.

Como uma opção para adicionar quantidades maiores de RAP pode ser usada o método de misturas asfálticas mornas. Essa diminuição leva a redução de consumo de energia durante o procedimento de reciclagem e da produção das misturas asfálticas na sua totalidade (BOHN, 2017).

Uma outra limitação encontrada no uso de misturas recicladas é remobilização do ligante asfáltico do material fresado. Nessa situação surge o método conhecido como “black rock” onde o material fresado é considerado um agregado normal dentro da mistura reciclada e não existe nenhum grau de remobilização do ligante envelhecido (BOHN *et al.*, 2020). A especificação Superpave, por meio das especificações da norma AASHTO M 323 – 13 recomenda, para quantidades entre 15% e 25% de material fresado adicionado, a utilização de um ligante novo com viscosidade reduzida. Para a adição de RAP em quantidades maiores que 25%, a AASHTO indica a utilização de gráficos de misturas (*blending charts*), com a

intenção de apontar o grau de desempenho (PG) que o ligante asfáltico novo deve mostrar para ser usado na mistura reciclada.

Segundo Doyle & Howard (2013) uma quantidade de 67% a 87% de ligante proveniente do RAP, é reusado na nova mistura, e os materiais com maior viscosidade possuem menores quantidades de ligante reutilizáveis. Os autores mostraram que a utilização de quantidade elevada de material fresado em misturas mornas é a alternativa mais viável, apesar da necessidade de maiores avanços com o uso dessa tecnologia para seu uso generalizado.

De uma maneira geral, à medida que aumenta a quantidade de material fresado é necessário analisar a incorporação de um agente rejuvenescedor (AR), com o objetivo de reparar as características do ligante asfáltico envelhecido (HAGHSHENAS *et al.*, 2016). O AR deve ser acertadamente dosado e combinado com o ligante asfáltico encontrado no material fresado.

Segundo Al-Qadi *et al.* (2007) a reutilização do material fresado não é somente uma opção vantajosa para o futuro, mas também é uma proteção econômica de concorrência para a construção de pavimentos flexíveis. Para Zubaran (2014) o aumento dos custos de ligante asfálticos e a rigidez das normas ambientais aumenta a necessidade de elevar a quantidade de RAP usada na construção ou restauração dos pavimentos. Dessa maneira, várias pesquisas estão sendo realizadas com a utilização de grandes teores de material fresado nas misturas asfálticas, ainda comprometido com o envelhecimento do ligante asfáltico proveniente nesse material.

A nação que se sobressai no uso da reciclagem a quente em pavimentos, é os Estados Unidos. De acordo com a NAPA – *National Asphalt Pavement Association* – (2017) eram usadas, em torno, de 20% de RAP em misturas mornas ou quente, em alteração ao agregado novo. A evolução da utilização desse material, quando contraposto aos anos de 2013, 2014, 2015 e 2016 foi de, respectivamente, 56%, 62,1%, 66,7% e 68,3%. Segundo os dados da NAPA (2018) a indústria de asfalto segue a ser a primeira em reciclagem no país, recuperando material fresado, em pavimentos asfálticos, a um índice superior a 99%. Ainda conforme a associação, 100% dos construtores apresentaram a utilização de RAP em 2017, pelo menos em alguma de suas misturas, 2% a mais quando comparado ao ano de 2016, quando 98% dos empreiteiros de pavimentos do país faziam uso de material fresado em misturas asfálticas (NAPA, 2017).

Quantitativamente, foram reutilizados 67,8 milhões de toneladas em 2017, uma elevação de 21% sobre o valor usado em 2013 (56 milhões de toneladas), no entanto quando

comparado com o ano de 2016 (68,3 milhões de toneladas) existiu uma diminuição de 1% sobre as toneladas usadas (NAPA, 2017). Considerando que tenha 5% de ligante asfáltico no material fresado, significaria mais de 3,4 milhões de toneladas de ligante preservado, entre os anos de 2016 e 2017, nos Estados Unidos.

2.2 Agentes rejuvenescedores

Por conta dos efeitos provocados pela temperatura, oxigênio, luz solar, chuva e tempo, o ligante asfáltico sofre um aumento da viscosidade, tornando-se mais consistente e provocando o envelhecimento e, conseqüentemente, a camada de revestimento asfáltico fica mais rígida (SILVA, 2014). De acordo com Tuchumantel (2012) o ligante asfáltico envelhecido tem uma elevação relativa na quantidade de asfalto e redução na quantidade de resinas e óleos aromáticos. Dessa maneira, para readquirir as características originais do ligante asfáltico, sobretudo, quando é usada misturas asfálticas recicladas.

Para isso é preciso o emprego de aditivos químicos ao ligante envelhecido, intitulados agentes rejuvenescedores, que diminuem a viscosidade e recolocam as resinas e os óleos aromáticos para que as características essenciais do ligante sejam recuperadas (DELLABIANCA, 2014).

Os agentes rejuvenescedores são constituídos, principalmente, de lubrificantes e óleos extensores, possuindo uma grande quantidade de maternos. A Quadro 2 mostra as cinco maiores categorias de agentes rejuvenescedores (NCAT, 2020).

Quadro 2 - Tipos de agentes rejuvenescedores

Categoria	Descrição
Óleos parafínicos	Óleos lubrificantes usados, refinados
Extratos aromáticos	Produtos petrolíferos refinados com compostos aromáticos polares
Óleos Naftênicos	Hidrocarbonetos modificados para modificação de ligantes asfálticos
Triglicerídeos e ácidos graxos	Derivados de óleos vegetais
Óleo de pinho	Subprodutos da indústria de papel (Mesma família química dos agentes de adesividade líquidos e emulsionantes)

Fonte: Adaptado NCAT, 2020.

Atualmente no mercado os principais agentes disponíveis são os rejuvenescedores à base de óleo de xisto e à base de alcatrão. Um dos agentes é disponibilizado pela empresa brasileira de petróleo (Petrobrás). Esta mercadoria, de origem de óleo de xisto, é separada em duas classes: a quente e a frio e é regida pela norma técnica DNC 04/97 portaria n° 44 de 29

de setembro de 1997. Os agentes a quente são designados “Aditivos Asfálticos de Reciclagem para Misturas a Quente” (AR) e os a frio são denominados de “Agentes de Reciclagem Emulsionados” (ARE). Todos esses agentes possuem seis tipos em relação a viscosidade do ligante asfáltico (SILVA, 2014).

Outro produto encontrado na indústria brasileira é o agente rejuvenescedor a base de alcatrão que foi criado pela companhia americana PRI (*Pavement Rejuvenation International*), denominado no comércio pelo nome de RejuvaSeal®. Esta mercadoria é comercializada no território nacional pela empresa SPM em associação com a empresa americana (SILVA, 2014).

Outros tipos de agentes rejuvenescedores são fabricados e lançados no mercado, continuamente, como óleos de base biológica e óleos vegetais modificados. Os óleos de base biológica são aqueles derivados, sobretudo, de gorduras e bio-solventes, já os óleos vegetais modificados são exemplos de agentes rejuvenescedores de reciclagem compostos por grupos de óleos vegetais básicos e produtos químicos incorporados. No entanto, grande parte desses produtos não são encontrados disponíveis no mercado e os que são encontrados são patenteados, o que prejudica uma descrição química mais detalhada e sua composição (BOHN, 2019)

2.2.1 Agentes rejuvenescedores a quente (AR)

O agente rejuvenescedor a quente é usado na restauração da viscosidade original do ligante asfáltico presente na mistura asfáltica reciclada, pois tem grupos aromáticos que objetivam restituir ao ligante as propriedades reológicas iniciais de ductilidade e consistência que foram deterioradas durante o envelhecimento ao longo prazo do pavimento asfáltico (MAZZONI *et al.*, 2018).

Os ARs são materiais de baixa consistência, utilizados em trabalhos de reciclagem a quente. A escolha do tipo de AR a ser utilizado no trabalho de restauração vai depender das propriedades de degradação do ligante original encontrado na mistura asfáltica que será reciclada. Quanto mais degradado se encontrar o ligante asfáltico envelhecido menor deverá ser a consistência do agente rejuvenescedor utilizado (FAROOQ *et al.*, 2018).

De acordo com Lima (2013), usualmente são conseguidos valores inapropriados da viscosidade do ligante asfáltico recuperado, devido às complicações de contaminação pelo solvente usado na reciclagem do ligante retirado da mistura asfáltica fresada, influenciando na definição da quantidade de AR necessário para proporcionar o rejuvenescimento do ligante asfáltico envelhecido de maneira adequada. O tempo necessário para realizar a mistura do AR

com os outros integrantes da mistura pode também provocar uma redução na eficiência do agente na restauração das características reológicas do ligante envelhecido, deixando este material com uma alta viscosidade e alterando a rigidez final da mistura asfáltica (SILVA, 2014).

Os agentes rejuvenescedores a quente são normatizados pela especificação técnica DNC nº04/97 – Portaria nº 44 de 29 de setembro de 1997 e são AR-1, AR-5, AR-25, AR-75, AR-250, AR-500. Os critérios desses produtos são mostrados na Tabela 2. A escala de concentração de óleo de xisto é formada pelo de concentração mais elevada (AR-1) e de concentração mais reduzida (AR-500).

Tabela 2 - Especificação de ARs

Características	Unid.	Especificações						Métodos	
		AR-1	AR-5	AR-25	AR-75	AR-250	AR-500	ABNT	ASTM
Viscosidade Cinemática a 60°C	cSt	Mín-Máx 50-175	Mín-Máx 176-900	Mín-Máx 901-4500	Mín-Máx 4501-12500	Mín-Máx 12501-37500	Mín-Máx 37501-60000	14756	D2170
Ponto de Fulgor	°C	218	218	218	218	218	218	11341	D92
Teor de Saturados	%	30	30	30	30	30	30		D2007
Efeito do Calor e do Ar a 163°C (RTFOT)									
Razão de Viscosidade	%	4	4	4	4	4	4	15235 ou 14736	D2872 ou D754
Varição de Massa	%	4	4	3	3	3	3		
Densidade 20/4°C	-	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	6293	D70

Fonte: DNC nº4, 1997.

2.2.2 Agentes rejuvenescedores a frio

Os agentes rejuvenescedores emulsionados (ARE) são produtos formulados, principalmente, para serem utilizadas em trabalhos de restauração de pavimento a frio em usina ou em campo (LIMA, 2013). O ARE é utilizado para restabelecer a viscosidade inicial do ligante asfáltico existente no revestimento que será restaurado, porque tem grupos aromáticos que objetivam restituir as propriedades reológicas iniciais de ductilidade e viscosidade que sofreram alteração devido o envelhecimento ao longo do prazo do pavimento asfáltico (MAZZONI *et al.*, 2018).

Os AREs são emulsões asfálticas catiônicas produzidas a partir de agentes rejuvenescedores a quente. A escolha do tipo de ARE a ser utilizado no trabalho de restauração irá depender das propriedades de degradação do ligante encontrado na mistura asfáltica que será reciclada. Quanto mais degradado e envelhecido se encontrar o ligante asfáltico antigo menor deverá ser a consistência do ARE utilizado (FAROOQ *et al.*, 2018).

Existem seis tipos de agentes rejuvenescedores emulsificadores e são classificados de acordo com a viscosidade do ligante asfáltico: ARE-1, ARE-5, ARE-25, ARE-75, ARE-250 e ARE-500, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações dos AREs

Características	Unid.	Especificações						Métodos	
		ARE-1	ARE-5	ARE-25	ARE-75	ARE-250	ARE-500	ABNT	ASTM
Ensaio sobre a emulsão									
Viscosidade Saybolt Furot a 25°C	Seg.	70 máx	70 máx	70 máx	70 máx	70 máx	70 máx	14491	244
Sedimentação	% p	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx	6570	6930
Peneiração 0,84 mm	% p	0,1 máx	0,1 máx	0,1 máx	0,1 máx	0,1 máx	0,1 máx	14393	6933
Carga da partícula	-	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	6567	244
Destilado Solvente	% v	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula	6568	6997
Destilado Resíduo	% p	60 mín	60 mín	60 mín	60 mín	60 mín	60 mín	6568	-
Ensaio sobre o Resíduo									
Viscosidade cinemática a 60°C	cSt	50-175	176-900	901-4500	4501-12500	12501-37500	37501-60000	14756	D2171
Teor de Saturado	% p	30 máx	30 máx	30 máx	30 máx	30 máx	30 máx	-	D2007
Efeito do Calor e do Ar a 163°C (RTFOT)									
Razão da Viscosidade	-	4	4	4	4	4	4	-	-
Variação de Massa	% p	4 máx	4 máx	3 máx	3 máx	3 máx	3 máx	-	-

Fonte: Betumel, 2010.

2.2.3 Agente rejuvenecedor a base de alcatrão

Logo depois da Primeira Guerra Mundial, os engenheiros do Exército Americano começaram vários estudos para fornecer um produto a partir dos derivados de petróleo com a intenção de aprimorar a manutenção de revestimentos asfálticos (SILVA, 2014). A década de 1970 foi uma fase fundamental para a produção de rejuvenescedores à base de alcatrão com a apresentação de um relatório denominado “Rejuvenescimento de pavimento asfáltico”, exibindo uma considerável melhora na consistência dos ligantes asfálticos analisados (FWA, 2006).

No ano de 1976, um estudo feito por engenheiros dos Estados Unidos mostrou que a utilização de rejuvenescedores a base de alcatrão RejuvaSeal® aumenta a vida de serviço útil do revestimento asfáltico. Já no término da década de 1980, os produtos rejuvenescedores foram indicados pela *Federal Aviation Administration* (FAA) para utilização em pistas de aeroportos. Nos dias atuais, o RejuvaSeal® é utilizado em grande parte dos países na preservação das estradas, pistas de aeroportos, pátios e portos. Foram feitas várias análises que indicaram que o RejuvaSeal® caracteriza uma opção que possui o melhor custo benefício, quando comparado com técnicas antigas de restauração (REJUVASEAL, 2010).

De acordo com Mah (2016) o RejuvaSeal é uma abordagem à base de alcatrão para pavimento asfáltico, oriundo de uma mistura de diversos produtos que tem duas funcionalidades principais: restauração e proteção do pavimento asfáltico envelhecido. Ainda segundo o autor as principais intervenções desse agente rejuvenescedor são separadas em duas fases:

- Diminuir o índice de envelhecimento do ligante asfáltico por meio de uma selagem e defesa da superfície do revestimento asfáltico, tratando como camada impermeável, com maior resistência a ação deletéria da água e dos combustíveis;
- Aumentar a vida de serviço do pavimento por meio do rejuvenescimento do ligante asfáltico nas camadas mais externas do pavimento, alcançando os vazios presentes na mistura e restaurando as propriedades reológicas de viscosidade e de ductilidade do ligante envelhecido.

Apesar do agente rejuvenescedor não modificar a estrutura do pavimento, o RejuvaSeal alcança a área externa do pavimento, rejuvenesce o ligante asfáltico impermeabiliza a superfície contra agentes deletérios, como a água, combustível e alguns materiais químicos (MAH, 2016).

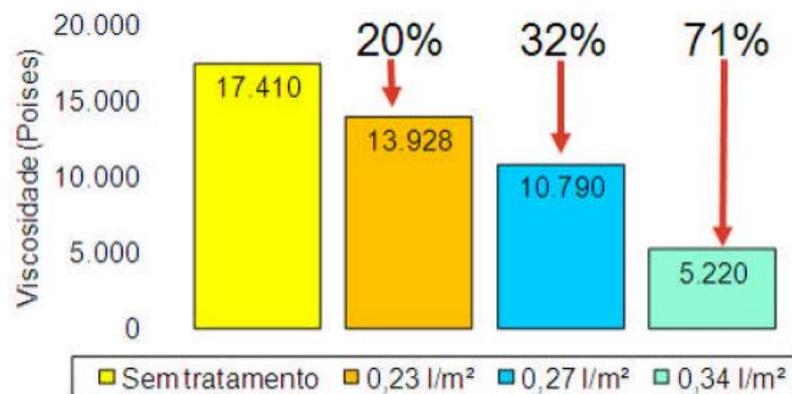
Sua utilização ocorre de maneira mecanizada, com controle da vazão por meio de computadores, capaz de alcançar uma média de 5.000 m² em um turno de oito horas e tempo médio de cura de três horas, com pavimento seco e com condições de temperaturas maiores que 20°C (SILVA, 2014). Segundo Mah (2016) o agente rejuvenescedor já foi usado em vários países onde merece destaque os Estados Unidos, Canadá e várias províncias da China e da Austrália.

A FWA (2006) realizou um estudo onde foi verificado as propriedades mecânicas de corpos de prova coberto com RejuvaSeal exposto a ação de combustíveis do tipo gasolina e óleo diesel. Os resultados mostraram que ao comparar as amostras que não utilizaram o

agente rejuvenecedor ocorreu uma diminuição da perda de estabilidade Marshall de 50 a 80%, um aumento na resistência à tração por compressão diametral de 10 a 30% e uma diminuição na perda do módulo de resiliência de 50 a 80%. Esses resultados significativos de diminuição na perda das características mecânicas após o ataque química indicam que a cobertura das amostras pelo agente rejuvenecedor diminui, de maneira expressiva, a ação nociva da gasolina e óleo diesel na mistura asfáltica.

Além dessa pesquisa, Mah (2016) realizou um estudo onde foi verificado que este tipo de agente rejuvenecedor diminuiu a viscosidade do ligante oxidado em até 71% para um índice de uso de 0,34 l/m², como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Efeito do RejuvaSeal na viscosidade do ligante asfáltico



Fonte: Mah, 2016.

Dessa maneira, foi verificado que o uso de agentes rejuvenecedores à base de alcatrão pode reduzir o impacto das ações prejudiciais do intemperismo e também, do desgaste químico causado pelo escoamento de combustíveis no pavimento asfáltico (MAH, 2016).

No Brasil, Silva (2017) realizaram um estudo, seguindo os mesmos processos de Mah (2016) onde corpos de prova foram cobertos por RejuvaSeal® e sujeitos às ações deletérias da água, gasolina, e a combinação destes. Os resultados mostraram uma redução na perda de resistência à tração e de módulo de resiliência dos corpos de prova sem o agente. As conclusões dos ensaios e análises estatísticas para a associação de água+gasolina apresentou o aumento da potência de agressão, seguido da gasolina e depois a ação da água isolada.

2.3 Óleo vegetal como agente rejuvenecedor de misturas asfálticas

A procura por agentes rejuvenecedores tem aumentado na indústria da pavimentação asfáltica, tanto para uso nas misturas asfálticas recicladas como para uso diretamente na

execução do revestimento asfáltico. Esses métodos diminuem a ânsia de novos produtos e reduzem o gasto energético relativo à produção de novos pavimentos (BARROS, 2020).

De maneira geral, os agentes rejuvenescedores de ligantes asfálticos tradicionais possuem uma grande fração de óleos combustíveis pesados para substituir as frações leves presente no ligante asfálticos que são perdidas durante o processo de envelhecimento desse material. No entanto, esses agentes sofrem uma volatilização elevada em altas temperaturas (JI, *et al.*, 2017). Além disso, por conta da procura de materiais oriundos de fontes renováveis, têm-se analisado a modificação dos agentes rejuvenescedores tradicionais, já apresentados nesse estudo, por produtos de fonte vegetal e de resíduos (ZARGAR *et al.*, 2012).

Segundo Portugal *et al.* (2017) os óleos de origem vegetal possuem grande quantidade de ácidos graxos não saturados e mostram alta resistência a elevadas temperaturas. Por isso, em virtude dos procedimentos de envelhecimento e rejuvenescimento do ligante asfáltico, os óleos vegetais podem ser usados para a restauração de ligante asfálticos oxidados.

Estudo realizado por Ji *et al.* (2017) analisou a incorporação de óleo de soja e de milho para restaurar as características reológicas de um ligante asfáltico oxidado, extraído de uma mistura reciclada. Os autores verificaram com os resultados que essa incorporação é eficaz na redução da rigidez e aumento da plasticidade do ligante oxidado, da mesma maneira que um agente rejuvenescedor tradicional, melhorando a trabalhabilidade da mistura.

A numerosa utilização de óleos vegetais na indústria de alimentos, tanto nas residências, como na área comercial e industrial, produz dificuldades no despejo ecologicamente correto dos óleos. Este óleo residual possui um elevado potencial contaminador, pois sua degradação possibilita a liberação do gás metano, assim como o despejo inadequado do óleo nas redes sanitárias de esgoto pode contaminar os corpos hídricos e o solo. Para isso, o uso do óleo de cozinha residual como agente rejuvenescedor torna-se uma alternativa de reuso sustentável bastante atraente (FAROOQ *et al.*, 2018).

Algumas pesquisas (ASLI *et al.*, 2012; AZAGAR *et al.*, 2016; ZARGAR *et al.*, 2012) analisaram a ação da incorporação de óleo de cozinha residual diante a performance de um ligante asfáltico oxidado. De maneira geral, todas essas pesquisas chegaram à conclusão de que o óleo de cozinha residual possui propriedades antioxidantes ao ligante envelhecido. Já observando as propriedades químicas, físicas e reológicas, o ligante asfáltico rejuvenescido não mostrou diferenças em seu desempenho em relação ao ligante novo.

2.3.1 Pesquisas com misturas asfálticas recicladas com óleos

Uma pesquisa realizada por Mazzoni *et al.* (2018) fez uso de agentes rejuvenescedores para restaurar a reologia e os componentes químicos do ligante asfáltico envelhecido encontrado no RAP, para assim verificar se é possível um aumento significativo na quantidade de RAP na mistura asfáltica.

Para isso os autores utilizaram três tipos de agentes rejuvenescedores comerciais, que são comumente utilizados na reciclagem a quente. O primeiro tipo chamado de tipo A, é um óleo bruto miscível derivado do processamento da madeira de pinho na indústria de papel e contém ácidos gordos, ácidos de resina e insaponificáveis. O segundo agente rejuvenescedor, tipo B, é uma mistura de diferentes produtos químicos constituídos de poliaminas modificadas e óleos vegetais. O terceiro agente rejuvenescedor, tipo C, é um aditivo orgânico refinado que consiste em alquilados e ácidos graxos. As características físicas dos três agentes rejuvenescedores são mostradas na Tabela 4

Tabela 4 - Propriedades básicas dos agentes rejuvenescedores

Agente rejuvenescedor	Densidade à 20°C (g/cm ³)	Viscosidade cinemática à 20°C (mm ² /s)
A	0,93	98
B	0,80	45
C	0,88	47

Fonte: Mazzoni *et al.*, 2018.

A investigação experimental foi realizada por meio do reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) que fornece a caracterização reológico de um ligante para pavimentação durante toda a sua vida útil, incluindo sua reutilização na reciclagem a quente adotando diferentes rejuvenescedores. Os resultados mostraram que os rejuvenescedores modificaram a química do ligante e conseqüentemente a reologia, melhorando a sua resposta viscosa. Além disso, foi observado que a oxidação é menos prejudicial, em termos de aumento de rigidez, no ligante envelhecido 50/50 (mistura de ligante virgem com ligante reciclado). Além disso, a adição de um rejuvenescedor na mistura contendo 50% de ligante reciclado a partir do RAP pode levar a um ligante menos sujeito a fenômenos de envelhecimento e até menos rígido no final da vida útil (MAZZONI *et al.*, 2018).

Ali *et al.* (2016) estudaram o impacto do envelhecimento e das quantidades de mistura asfáltica reciclada sobre a eficácia do uso de agentes rejuvenescedores no ligante asfáltico. Para isso os autores analisaram a capacidade de cinco rejuvenescedores (óleo naftênico, óleo parafínico, extratos aromáticos, óleo alto ou *tall oil*, e ácido oleico) de ligante asfálticos para

restaurar o desempenho do ligante a baixa e alta temperatura. Foram analisados vários grupos de misturas asfálticas com diferentes quantidades de RAP (25% a 45%) além de misturas de controle que não incluíam os agentes rejuvenescedores.

Todas as misturas foram misturadas em tempos de envelhecimento de duas e seis horas para avaliar o impacto do envelhecimento na eficácia dos diferentes tipos de agentes rejuvenescedores, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz das misturas asfálticas estudadas

	Porcentagem de RAP (%)					
	0		25		45	
	Período de envelhecimento (horas)					
	2	6	2	6	2	6
Ligante asfáltico puro PG 76-22	x	x	X	x	X	x
Óleo Naftênico			X	x	X	x
Óleo Parafínico			X	x	X	x
Extratos Aromáticos			X	x	X	x
Óleo Alto			X	x	X	x
Ácido Oleico			X	x	X	x

Fonte: Ali *et al.*, 2016.

Após o envelhecimento e a compactação, o ligante asfáltico contido em cada uma dessas misturas foi extraído e recuperado. Foram realizados testes no reômetro dinâmico de cisalhamento e no reômetro de feixe de flexão. Os ligantes asfálticos recuperados foram considerados envelhecidos pelo processo do RTFOT. Além disso, foi realizada uma Análise de Variância Multifatorial (ANOVA) para avaliar a significância estatística das diferenças entre os resultados (ALI *et al.*, 2016).

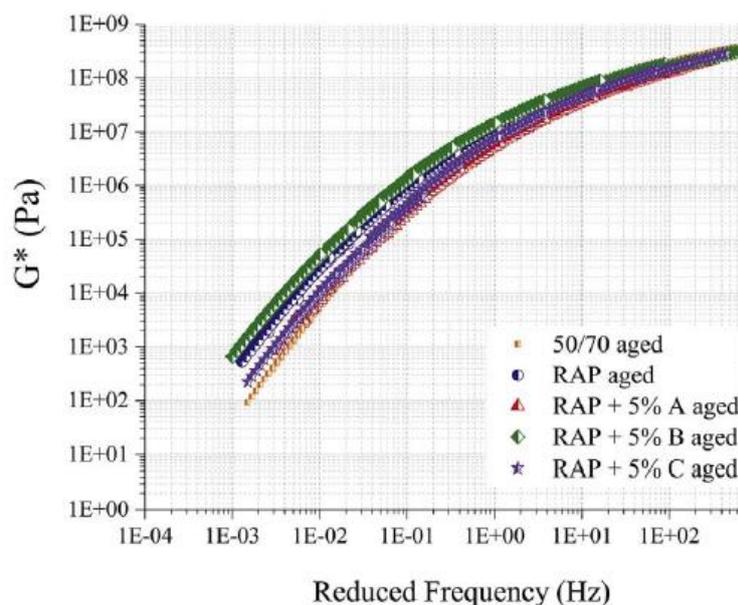
Os resultados da pesquisa de Ali *et al.* (2016) mostraram que todos os ligantes com adição de agentes rejuvenescedores apresentaram desempenho inferior ao do ligante de controle, sem rejuvenescimento. Além disso, a eficácia dos rejuvenescedores não foi afetada pelo envelhecimento e pelo aumento da quantidade de RAP. Mas, de todos os utilizados pelos autores os óleos foram os mais eficazes para rejuvenescer a mistura asfáltica fresada envelhecida, enquanto os agentes rejuvenescedores obtidos de extratos aromáticos foram os menos capazes de rejuvenescer as características em baixas temperaturas. Além disso, os rejuvenescedores com ácido oleico foram os menos eficazes no rejuvenescimento em alta temperatura.

Cavalli *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa avaliando o efeito do envelhecimento nas propriedades mecânicas e químicas do ligante extraído do RAP utilizando três tipos diferentes de agentes rejuvenescedores de base biológica: rejuvenescedor “A” à base de óleo natural de sementes, rejuvenescedor “B” à base de óleo de casca de castanha de caju e rejuvenescedor “C” à base de óleo alto.

Para isso foram realizados testes reológicos que mostram como os ARs podem restaurar as propriedades mecânicas do ligante asfáltico da mistura fresada. Também foi proposto um índice de envelhecimento, após realizado o procedimento RTFOT e PAV, para mostrar que os agentes rejuvenescedores são afetados diretamente pelo envelhecimento. Apesar da adição, a oxidação físico-química não se reverteu e as alterações mecânicas não foram causadas por modificações químicas no nível dos grupos funcionais, mas por um rearranjo de componentes polares/ não polares (CAVALLI *et al.*, 2018).

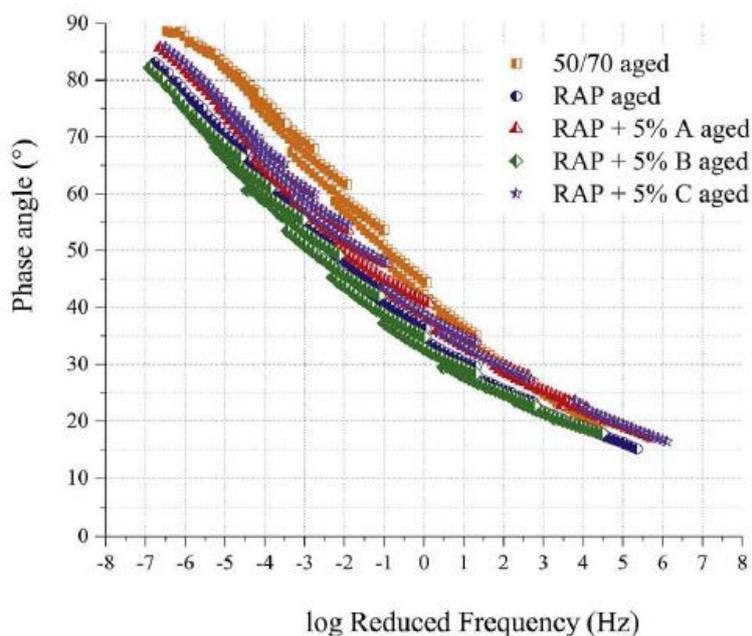
De acordo com os autores, os resultados mostraram que considerar o efeito do envelhecimento é vital para identificar como os agentes rejuvenescedores afetam quimicamente e mecanicamente o ligante do RAP. Os testes realizados no DSR mostraram que todos os agentes rejuvenescedores investigados poderiam melhorar as propriedades mecânicas dos ligantes extraídos da mistura fresada. No entanto, apenas dois rejuvenescedores poderiam restaurar mecanicamente o ligante RAP envelhecido para um nível semelhante ao ligante virgem, mostrando diferenças significativas nos resultados do módulo complexo e ângulo de fase, como mostram as Figura 5 e Figura 6, respectivamente.

Figura 5 - Módulo complexo das misturas analisadas



Fonte: Cavalli *et al.*, 2018.

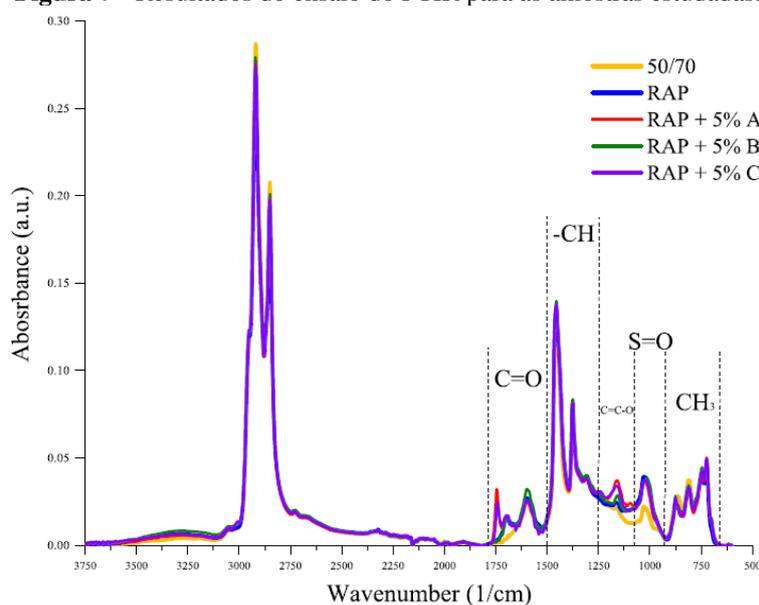
Figura 6 - Ângulo de fase das amostras estudadas



Fonte: Cavalli *et al.*, 2018.

Além disso, Cavalli *et al.* (2018) também demonstraram como as mudanças mecânicas devido aos agentes rejuvenescedores não foram provocados por alterações nas ligações químicas/grupos funcionais, mas devido a um rearranjo em níveis mais altos de escala molecular, como componentes polares e não/polares. Isso foi verificado por meio de ensaio do FTIR mostrado na Figura 7.

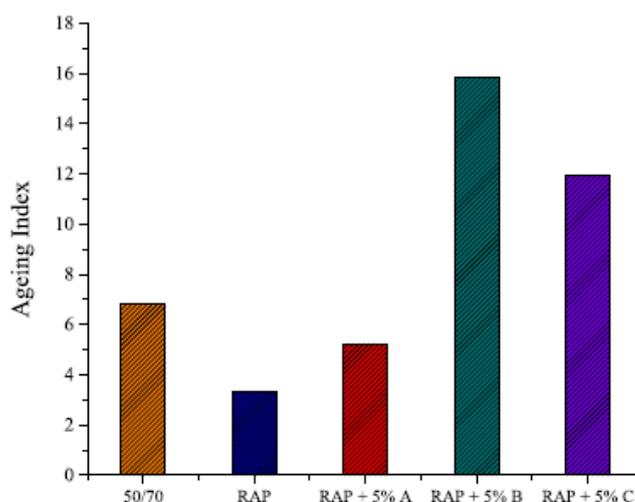
Figura 7 - Resultados do ensaio do FTIR para as amostras estudadas.



Fonte: Cavalli *et al.*, 2018.

O índice de envelhecimento mecânico (IA) analisado nas amostras, demonstrou que o ligante asfáltico puro 50/70 envelheceu mais que o ligante extraído da mistura asfáltica fresada. A amostra com a adição de agentes rejuvenescedores que foi menos influenciada, foi a RAP + 5% A (Figura 8). Os autores também verificaram que após o envelhecimento, o índice de envelhecimento químico (CAI) aumentou para cada amostra demonstrando que a oxidação no nível do grupo funcional é ainda presente após a incorporação de agentes rejuvenescedores (CAVALLI *et al.*, 2018).

Figura 8 - Variação do índice de envelhecimento dos diferentes ligantes.



Fonte: Cavalli *et al.*, 2018.

2.4 Planejamento fatorial

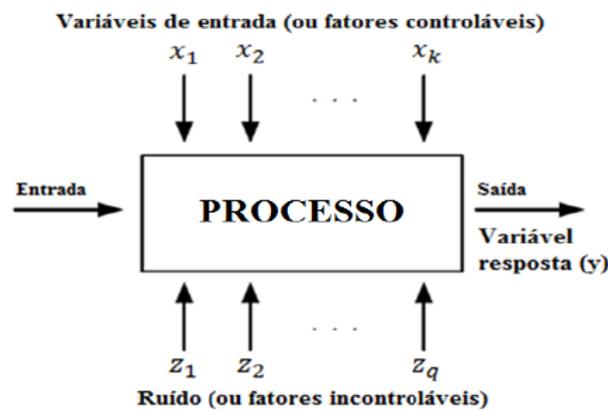
Um experimento pode ser definido como um teste em que mudanças propositalmente são realizadas nos fatores de entrada do procedimento (ou sistema), de maneira que seja possível analisar e reconhecer as razões para as mudanças ocorridas na sua variável resposta. Eles são realizados em aproximadamente todas as áreas de investigação, como por exemplo: indústria química, farmacêutica, agrícola, têxtil, entre outras. E, frequentemente, têm a intenção de adquirir informações sobre um procedimento específico (BARROS NETO *et al.*, 2007).

Utilizando a organização de testes, os investigadores buscam retirar do sistema em análise o máximo de esclarecimentos úteis, realizando uma quantidade otimizada de experimentos. Em consequência, é possível aperfeiçoar ou melhorar sistemas, procedimentos e produtos e assim reduzir a quantidade de experimentos necessários com o objetivo de agilizar o procedimento e diminuir os esforços (MONTGOMERY, 2009).

Segundo Montgomery (2009) os procedimentos podem ser definidos como a combinação de metodologias, pessoas e outros recursos que mudam algumas entradas, em

geral, um certo produto em uma saída, que pode apresentar um ou mais retornos reconhecíveis, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Representação de um experimento



Fonte: Montgomery, 2009.

É possível observar que uma variante de entrada é apontada como controlável se os valores que ela atingir, definidos de níveis, for estabelecido antes do começo dos testes. Os parâmetros de entrada controláveis que são de interesse do investigador, geralmente, são denominados de fatores controláveis, onde a modificação pode ou não alterar o resultado final do procedimento, seja de forma separada ou com a interação de um ou mais parâmetros do mesmo procedimento. As interações possíveis entre os níveis de fatores são chamadas de tratamento (BORTOLINI, 2012).

É fundamental destacar que nem todos os fatores influenciam na performance da mesma maneira, ou seja, alguns fatores podem mostrar grandes influências, já outros podem nem ter a influência na variável resposta (y) e poderão ser rejeitados posteriormente (ANTONY, 2003).

Quando se pretende analisar duas ou mais variáveis de interesse em uma pesquisa, é necessário utilizar um planejamento fatorial. O objetivo desse planejamento é proporcionar uma associação de todos os fatores em todos os níveis, a fim de obter verificação de uma variável, sujeita a todas as outras combinações. Também é a única forma provável de antecipar combinações entre os fatores (MONTGOMERY *et al.*, 2012). O principal benefício do uso do planejamento fatorial é permitir analisar o efeito do uso de várias variáveis simultaneamente, com uma quantidade limitada de testes. Essa situação acontece devido à combinação entre os diversos parâmetros e níveis das variáveis analisadas, que em cada réplica, são investigadas todas as prováveis combinações (BARROS *et al.*, 1996).

O uso dos planejamentos fatoriais, além de determinar as várias associações entre as distintas variáveis, possibilita também definir a presença ou não de linearidade da resposta. A linearidade indica que a mudança da resposta do sistema ao alterar um fator de um nível até outro é diretamente proporcional. Caso não exista linearidade, o que ocorre é que, a alteração da resposta do sistema não será diretamente proporcional à alteração no nível do fator. Para poder indicar esses comportamentos de linearidade ou não da resposta, além dos testes de níveis inferiores e superiores, é necessário realizar um teste a mais nos níveis médios de todos os parâmetros (ponto central) (RODRIGUES *et al.*, 2009).

Além dessas vantagens existem outros benefícios do uso de planejamento fatorial como destaca Button (2005):

- Diminuição da quantidade de testes sem que ocorra déficit da qualidade da informação;
- Estudo concomitante de várias variáveis, separando seus efeitos;
- Indicação da confiabilidade dos resultados;
- Execução do estudo em fases, realizando um procedimento iterativo de acréscimo de novos testes;
- Seleção das variáveis que afetam num procedimento com quantidade limitada de testes;
- Representação do procedimento analisado por meio de expressões matemáticas;
- Formação de conclusões a partir de resultados qualitativos.

De acordo com Rodrigues (2009) o planejamento fatorial normalmente é representado por N^k , sendo k a quantidade de variáveis analisadas e N seus níveis. Desta maneira, o caso mais simples de combinação é aquela em que cada fator k está presente em dois níveis (2^k), ou seja em um teste com k variáveis e dois níveis, serão feitos $2 \times 2 \times \dots \times 2$ (k vezes) = 2^k observações da variável resposta. Os níveis são usualmente codificados com os sinais (+) e (-). Cunico *et al.* (2008) indicam que em um planejamento fatorial, as repetições de ensaios são importantes na determinação do erro experimental na resposta da pesquisa.

Quando se trata de um fatorial 2^k sem repetições são observadas dificuldades de se efetuarem interferência sobre as respostas adquiridas. Desta maneira, são adicionados pontos centrais no espaço experimental. Estes pontos são representados por (0) e podem fornecer informações sobre o comportamento das respostas além de evidenciar a qualidade da repetibilidade do procedimento (RODRIGUES, 2009).

Nessa situação, é fundamental fazer um mínimo de três repetições, pois o nível de reprodução do teste nesse ponto central do plano fatorial possibilita avaliar o erro global do experimento, levando em consideração que esse erro é semelhante em todo o plano do experimento. O planejamento fatorial com a incorporação dos pontos centrais é determinado como delineamento composto central (DCC) (MONTGOMERY, 2009). É possível ainda fazer delineamentos com a incorporação de pontos axiais, dessa maneira é realizável uma rotação no modelo, sendo chamado de delineamento composto central rotacional (DCCR). (RODRIGUES *et al.*, 2009).

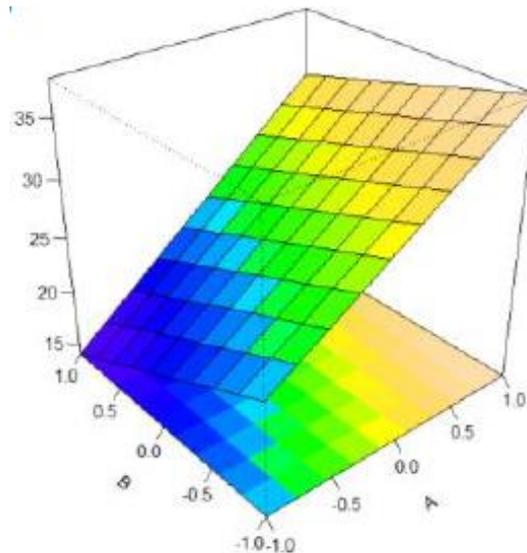
No caso do DCCR, a região de análise é maior com uma menor quantidade de testes a serem realizados, sendo possível calcular o erro experimental quando se toma a precaução de repetir pelo menos três vezes a condição de ponto central, indispensável para analisar a reprodutibilidade do procedimento. É possível, ainda, produzir um modelo matemático que, se validado estatisticamente, pode ser utilizado para a obtenção da superfície respostas e por meio desta análise verificar as condições otimizadas.

De acordo com Branco (2003) alguns tipos de dificuldades científicas compreendem a expressão de um fator resposta, tal como o rendimento de um produto, com uma finalidade empírica de uma ou mais variáveis quantitativas, como temperatura de reação e a pressão. Isso pode ser executado usando uma superfície de resposta (SR) para moldar a relação rendimento = f (temperatura de reação, pressão). A compreensão da maneira funcional de f possibilita tanto a sumarização dos resultados do teste como a prevenção da resposta para os valores das variáveis quantitativas.

Na programação de testes, para analisar ou aprimorar superfícies de respostas, a função resposta é definida em uma área de relevância do pesquisador. Após ajustamento do modelo aos dados, existe a possibilidade de estimação da sensibilidade da resposta às variáveis, além de poder definir os níveis de fatores nos quais a resposta é ótima (SILVA, 2008).

Para Silva (2017) em um gráfico de SR, os valores das duas variáveis são mostrados nos eixos x e y, ao mesmo tempo que os valores de respostas estão no eixo z. Esse gráfico proporciona uma visão tridimensional como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Exemplo de superfície de resposta para delineamento composto central



Fonte: Silva, 2017.

2.5 Considerações finais

Com base na revisão bibliográfica, foi possível observar a necessidade de novas tecnologias de misturas asfálticas na manutenção das rodovias para reduzir os danos provocados pelo descarte inadequado do material fresado ao meio ambiente. Uma das opções é a sua reutilização na fabricação de novas misturas asfálticas, mas para isso existe a necessidade de estudar novos métodos para melhorar sua trabalhabilidade, visto que o uso de altas quantidades de material fresado podem criar misturas com alta rigidez e com desempenho comprometido (AL-QADI *et al.*, 2012)

Uma das maneiras de melhorar a trabalhabilidade e recuperar as propriedades essenciais do ligante asfáltico envelhecido, presente no material fresado, é a adição de óleo vegetal como agente rejuvenescedor. Várias pesquisas utilizaram o óleo vegetal residual para modificar o ligante asfáltico (PORTUGAL *et al.*, 2017; LUCENA, *et al.*, 2018; LUZ *et al.*, 2019), pois é uma opção ecologicamente viável, podem ser usados para recuperar as propriedades dos ligantes envelhecidos, reduzir sua viscosidade e conseqüentemente diminuir os gastos na usina, além de aumentar sua estabilidade à estocagem (LUZ *et al.*, 2019). Assim, este estudo busca otimizar o percentual de utilização das misturas asfálticas recicladas com a modificação do ligante com óleo vegetal residual.

3 MATERIAS E MÉTODOS

Nesta seção, será apresentada inicialmente uma breve descrição dos materiais utilizados nesta pesquisa e a metodologia utilizada para caracterizá-los, para em seguida apresentar a caracterização dos mesmos. Além disso, será abordado como foi feito o planejamento fatorial e as dosagens das misturas asfálticas seguindo este planejamento.

3.1 Materiais

3.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa é o CAP 50/70, mais utilizado na região nordeste e foi fornecido pela empresa Rocha Cavalcante do município de Campina Grande.

3.1.2 Agregado graúdo

Os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa foram a brita 19mm e brita 12,5 mm (Figura 11) de origem granítica, ambas foram fornecidas pela Pedreira Rocha Cavalcante. As amostras foram selecionadas de acordo com método B da norma DNIT-PRO 199/96.

Figura 11 - Agregados graúdos



3.1.3 Agregados miúdos

Os agregados miúdos usados nesse estudo foram a areia e o pó de pedra (Figura 12), onde a areia foi adquirida no mercado local e o pó foi fornecido pela Pedreira Rocha Cavalcante.

Figura 12 - Agregados miúdos



3.1.4 Fíler

O Fíler usado foi a cal hidratada adquirida no comércio local.

3.1.5 Material fresado

O material fresado, ilustrado na Figura 13, foi disponibilizado pela empresa JBR Engenharia LTDA. As operações de fresagem ocorreram no trecho compreendido entre os quilômetros 35,7 e 42 da BR 230 e a espessura de fresagem foi de 5 cm. O projeto do trecho em questão tinha um período de 10 anos, para um número de operações do eixo padrão de $9,37 \times 10^7$ com o revestimento do tipo CBUQ.

Figura 13 - Material fresado



3.1.6 Óleo vegetal residual

O óleo residual de origem vegetal (Figura 14) foi obtido por meio da empresa INDAMA, que atua na coleta de óleo vegetal. Durante o procedimento de mistura foi adotada como referência a pesquisas de Portugal *et al.* (2017). O CAP 50/70 foi primeiramente aquecido a uma temperatura de 135°C e em seguida foi adicionado o óleo vegetal residual nos teores de 1%, 2%, 3% e 4%. Em seguida, a mistura foi agitada durante 20 minutos e com uma velocidade máxima de 410 rpm no misturador mecânico.

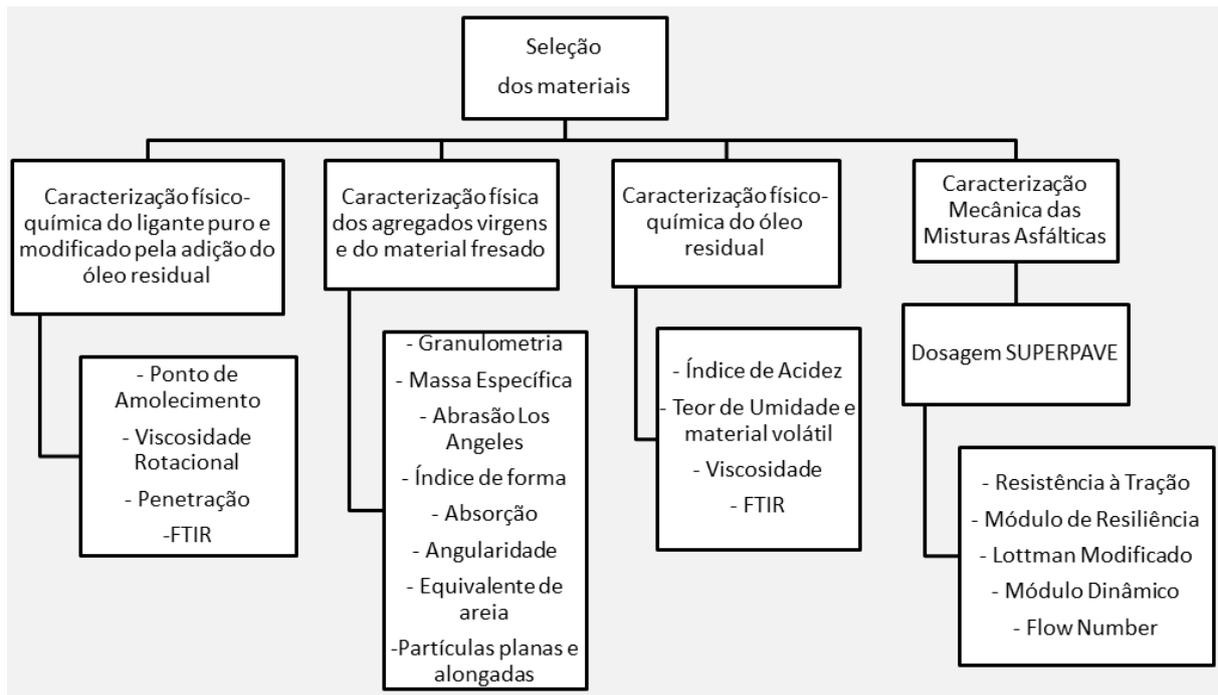
Figura 14 - Óleo vegetal residual



3.2 Métodos

O procedimento experimental deste estudo foi separado em 4 etapas como mostrado no fluxograma da Figura 15. As três primeiras etapas têm como objetivo selecionar e definir as propriedades físicas e/ou químicas dos materiais utilizados (ligante asfáltico, agregados, material fresado e óleo vegetal residual). Na última etapa foi realizada a dosagem e caracterização mecânicas das misturas asfálticas desenvolvidas.

Figura 15 - Etapas da pesquisa



Os métodos de ensaios utilizaram como base normas da ASTM (American Society for Testing Materials), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

3.2.1 Propriedades físicas e reológicas e dos materiais

Os ensaios realizados para a determinação das propriedades físicas dos agregados e ligante asfáltico foram executados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), na Universidade Federal de Campina Grande.

3.2.1.1 Agregados

Foram realizados os ensaios listados no Quadro 3 para a determinação das propriedades físicas dos agregados.

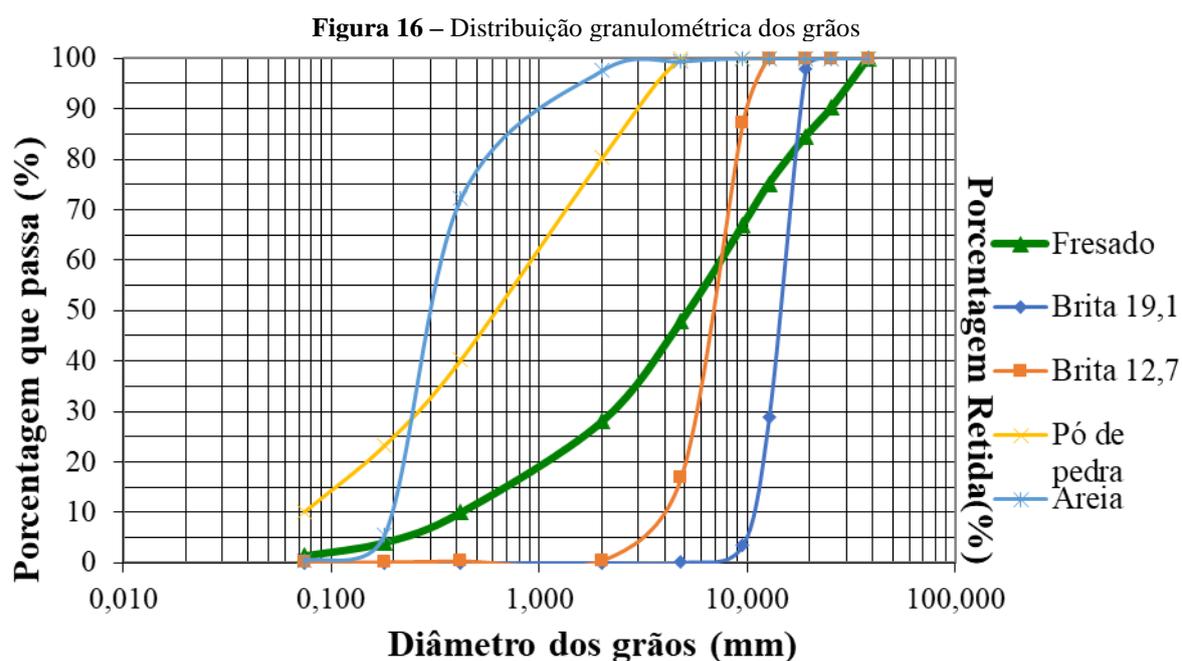
Quadro 3 - Ensaios realizados nos agregados e suas especificações

ENSAIOS	ESPECIFICAÇÕES
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT-ME 083/98
Massa específica real e absorção do agregado graúdo	DNIT-ME 081/98
Massa específica real dos agregados miúdos	DNIT-ME 084/95
Equivalente areia	DNIT-ME 054/97
Abrasão “Los Angeles”	DNIT-ME 035/98

A análise granulométrica foi realizada em todos os agregados utilizados nessa pesquisa e os resultados estão apresentados na Tabela 6 e na Figura 16.

Tabela 6 - Quantidade passante acumulada dos materiais utilizados

Peneiras		Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de Pedra	Areia	Material Fresado
1’’	25,40	100%	100%	100%	100%	90,29%
3/4 pol’’	19,00	98,47%	100%	100%	100%	84,63%
1/2 pol’’	12,70	39,37%	100%	100%	100%	75,31%
3/8 pol’’	9,53	11,93%	87,34%	100%	100%	67,08%
Nº4	4,80	0,84%	16,98%	99,98%	99,36%	48,15%
Nº 10	1,65	0,83%	0,46%	80,28%	97,58%	28,44%
Nº 40	0,42	0,26%	0,34%	40,37%	72,38%	10,56%
Nº 80	0,18	0,24%	0,16%	23,33%	5,61%	4,65%
Nº 200	0,075	0,20%	0,10%	10,16%	0,46%	2,01%



A Tabela 7 mostra os valores encontrados para os agregados graúdos nos demais ensaios realizados neste estudo, assim como os limites desses parâmetros especificados nas normas.

Tabela 7 - Caracterização física dos agregados graúdos

Ensaio	Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Limites
Massa específica real (g/cm ³)	2,75	2,75	-
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,74	2,73	-
Absorção (%)	0,39	0,60	≤ 2
Abrasão “Los Angeles” (%)	21,01	-	≤ 55
Partículas planas e alongadas (%)	1,07	1,00	1 ≤ 5
Partículas fraturadas – duas faces (%)	99,88	99,89	≥ 90
Índice de forma	0,88	0,74	≥ 0,5

A Tabela 8 apresenta os valores dos testes para determinação das propriedades físicas dos agregados miúdos utilizados nessa pesquisa, e também os seus respectivos limites determinados pelas normativas.

Tabela 8 - Caracterização física dos agregados miúdos

Ensaio	Pó de pedra	Areia	Limites
Massa específica real (g/cm ³)	2,70	2,50	-
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,58	2,42	-
Absorção (%)	0,39	0,26	≤ 2
Equivalente areia (%)	86,39	47,20	≥ 55
Angularidade (%)	46,58	45,76	45 % (mín)

3.2.1.2 Ligante asfáltico

Para a caracterização física e reológica do ligante asfáltico puro e modificados com óleo residual vegetal foram realizados os ensaios listados no Quadro 4. Esses ensaios foram executados também, após a realização do procedimento de envelhecimento a curto prazo (Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT).

Quadro 4 - Ensaios físicos e reológicos realizados nos ligantes asfálticos e suas especificações

ENSAIOS/ PROCEDIMENTOS	ESPECIFICAÇÕES
RTFOT	ASTM D 2872-04
Penetração	DNIT-ME 155/2010
Ponto de amolecimento	DNIT-ME 131/2010
Viscosidade rotacional	NBR 15187/2007
Performance grade	ASTM D6373-13
Multiple Stress Creep and Recovery – MSCR	ASTM D7405-15
Linear Amplitude Sweep – LAS	AASHTO TP 101 – 12

Os resultados dos ensaios realizados no ligante asfáltico puro, CAP 50/70 são mostrados na Tabela 9, assim como seus limites preconizados pelas normas citadas na tabela anterior.

Tabela 9 - Caracterização física e reológica do ligante asfáltico puro

Característica	CAP 50/70	Limites
Perda de massa (%)	0,06	≤ 0,5%
Penetração (0,1 mm)	53,00	50-70
Ponto de amolecimento (°C)	54,00	46 (mín)
Viscosidade rotacional (cP)	135°C	487,50
	150°C	248,20
	177°C	92,75
PG (°C)	64	-
MSCR	Jnr _{0,1} (1/kPa)	1,55
	Jnr _{3,2} (1/kPa)	2,58
LAS	Parâmetro A	1,89 x 10 ⁸
	Parâmetro B	4,194

Foi realizado também o cálculo do Índice de Suscetibilidade Térmica (IST) por meio da Equação 1.

$$IST = \frac{500 \cdot \text{Log}(P) + 20 \cdot PA - 1951}{120 - 50 \cdot \text{Log}(P) + PA} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

IST = Índice de Suscetibilidade Térmica;

PA = Ponto de Amolecimento do CAP (°C);

P = Penetração a 25°C (0,1 mm)

O IST do ligante asfáltico encontrado foi de -0,102, estando dentro do intervalo recomendado pela norma do DNIT - ME 095/2006 que é de -1,5 a 0,7.

Foi possível obter também a temperatura de usinagem (TU) e temperatura de compactação (TC) do CAP 50/70 por meio do ensaio de viscosidade rotacional. As TU e TC foram calculadas por um método tradicional que determina uma TU na qual o ligante tenha uma viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e uma TC na qual apresente viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Assim para o ligante asfáltico puro foi encontrada uma TU de 162°C e uma TC de 146°C .

3.2.2 Propriedades químicas do ligante asfáltico e óleo vegetal residual

Para melhor compreensão a respeito das propriedades físico-química do óleo vegetal residual foram realizados testes para determinação do seu teor de umidade e acidez. Ambos os ensaios foram realizados no laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande.

O teor de umidade e material volátil determinado foi de 0,36% e para sua determinação foi usado o método-químico para análise de alimentos do Instituto Adolfo Luz (1985) onde ocorre a secagem em estufa do óleo e pesagem do material. O teor de acidez encontrado no óleo vegetal residual foi de 2,2% e também foi utilizada a metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Luz (1985) que realiza a titulometria ácido-base. A determinação da viscosidade dinâmica ou absoluta, foi determinada com auxílio de um viscosímetro digital, utilizando uma velocidade de 60 rpm, sendo para a temperatura média de 25°C de 55,3 Mpa.s.

Também foi feito uma análise FTIR (Fourier Transform Infrared) que é uma análise analítica baseada na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}). Ela permite verificar os diferentes tipos de ligações e funções químicas nas moléculas contidas nas amostras, especialmente em moléculas orgânicas, ao apresentar picos relacionados a vibrações. No ligante asfáltico o FTIR é usado para determinar os níveis de oxidação, assim como determinar de maneira qualitativa e/ou semi-quantitativa a presença de aditivos orgânicos (PAVIA *et al.*, 2010).

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier além de realizada no óleo vegetal residual foi feita também nas amostras de ligante asfáltico antes e após a incorporação dos diferentes teores de óleo vegetal residual com o objetivo de verificar se houve mudanças na composição química do ligante asfáltico puro após a inserção do óleo na matriz asfáltica. Para verificar as alterações do envelhecimento esse ensaio também foi realizado em amostras submetidas ao processo de RTFOT.

O ensaio FTIR foi realizado no LAMMEN – Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica – ECT da Universidade Federal do Rio Grande do Norte

(UFRN). Estas análises foram realizadas em 16 varreduras de espectro com resolução de 4 cm^{-1} . O equipamento utilizado foi um espectrômetro BRUKER, modelo FT-IR VERTEX 70.

3.2.3 Planejamento experimental fatorial

Para caracterizar as misturas asfálticas com asfalto fresado e ligante asfáltico modificado com óleo vegetal residual foi escolhido o método de experimentação fatorial, pois este é o mais completo e rápido do que o método de experimentação clássico, diante a quantidade de variáveis independentes e dependentes envolvidas.

3.2.3.1 Variáveis Independentes

Existem diversos parâmetros envolvidos no procedimento de dosagem e determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, como por exemplo, quantidade e tipo de ligante asfáltico, a granulometria dos agregados, o processo de envelhecimento, as temperaturas de usinagem e compactação, energia de compactação, presença ou não de fíler e/ou outros materiais, entre outros (ILDEFONSO, 2007). No entanto, para tornar a pesquisa executável foi necessário considerar apenas duas variáveis independentes, consideradas as mais importantes para este estudo: o teor de óleo vegetal residual adicionado no ligante asfáltico usado na mistura asfáltica e a quantidade de material fresado.

- Teor de óleo vegetal: essa variável teve por objetivo verificar a influência deste aditivo nas propriedades químicas, físicas e reológicas do ligante asfáltico assim como nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas.
- Teor de material fresado: essa variável foi escolhida com a intenção de determinar a possibilidade de uso em quantidades maiores que 30% de material fresado em uma mistura asfáltica com óleo vegetal residual como potencial aditivo rejuvenescedor.

Para as variáveis indicadas como independentes foram estudados três níveis de teor de óleo vegetal residual e três níveis de quantidade de material fresado usado. Os critérios de escolha foram baseados na literatura técnica.

3.2.3.2 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes deste estudo são afetadas por alterações nas variáveis independentes:

- Resistência à tração por compressão diametral;

- Módulo de Resiliência;
- Dano por umidade induzida (Lottman modificado);
- Módulo Dinâmico;
- Flow Number.

Todos os testes foram feitos em corpos de prova moldados de acordo a metodologia Superpave. De acordo com a literatura, e segundo os preceitos do planejamento fatorial com DCC, os níveis de quantidade de óleo vegetal residual escolhidos para o estudo foram 0%, 2% e 4%, e as quantidades de material fresado foram 0%, 30% e 60% (denominadas de MF0, MF30 e MF60, respectivamente) onde os pontos centrais da mistura foram 2% de óleo vegetal residual e 30% de material fresado. A Tabela 10 apresenta os pontos centrais para os fatores e níveis estudados.

Tabela 10 - Condições experimentais para as variáveis e níveis propostos

Variável	-1	0	+1
Teor de óleo vegetal residual	0%	2%	4%
Teor de material fresado	0%	30%	60%

O delineamento fatorial é do tipo 2^2 + três pontos centrais e resulta numa matriz de sete ensaios como mostrados na Tabela 11. Os ensaios mecânicos foram feitos com duas repetições para cada condição experimental.

Tabela 11 - Matriz de ensaio corrido

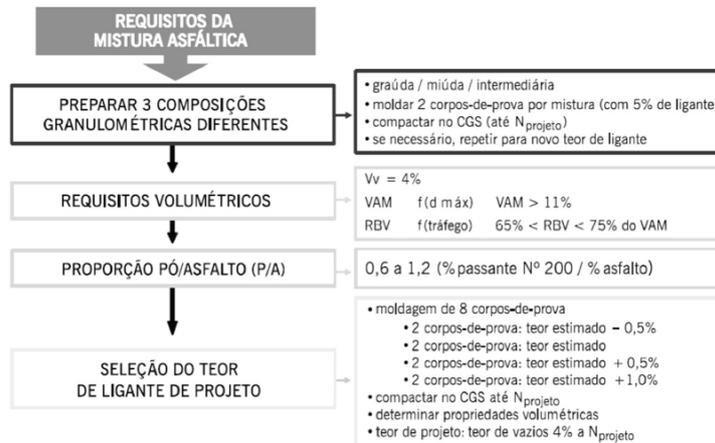
Condição Experimental	1	2	3	4	5 (C)	6 (C)	7 (C)
Óleo residual	-1	-1	1	1	0	0	0
Material Fresado	-1	1	-1	1	0	0	0

(C) = Central; Pontos centrais.

3.2.4 Dosagem SUPERPAVE

Com o objetivo de determinar o teor ótimo de ligante asfáltica para cada mistura asfáltica pesquisada, foi realizado a metodologia da dosagem SUPERPAVE que é apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Metodologia da dosagem SUPERPAVE



Para cada mistura asfáltica foi seguido o mesmo procedimento, alterando apenas as quantidades de materiais presentes em cada tipo de mistura. Primeiramente foi escolhida a composição granulométrica da mistura com os agregados utilizados na pesquisa enquadradas na faixa C do DNIT, incluindo as definições de Pontos de Controle e Zonas de Restrição. Em posse da granulometria de cada um dos materiais usados foi realizada três composições granulométricas para cada mistura asfáltica: uma composição superior (próximo ao limite superior da faixa), uma composição intermediária (na região mediana da faixa) e uma composição inferior (próxima ao limite inferior da faixa).

Após a composição das curvas foram produzidos 18 corpos de prova para cada mistura asfáltica (com teor de ligante igual a 5%), sendo 6 corpos de prova para cada curva em questão. Conforme a norma ASTM D 6925-09 os corpos de provas devem ser compactados em diferentes números de giro de acordo com o volume de tráfego usado (Bernucci *et al.*, 2008), dessa maneira para essas 6 amostras foram usados 3 números de giros diferentes (Ninicial, Nprojeto e Nmáximo).

Outro parâmetro usado foi a densidade máxima medida (Gmm), determinada por meio do ensaio chamado de RICE TEST, determinado pela norma ASTM D 2041. Após a compactação dos corpos de prova e determinação da Gmm foi possível determinar os valores de V_v (volume de vazios), VAM (vazios no agregado mineral) e Gmm e dessa maneira escolher a curva a ser usada para cada mistura asfáltica em estudo.

Para a MF0 foi escolhida a curva intermediária e para as MF30 e MF60 a curva escolhida foi a superior, destacando que o material fresado foi considerado um agregado normal dentro da mistura reciclada e não existiu nenhum grau de remobilização do ligante envelhecido (“black rock”). A Tabela 12 mostra as proporções de material das composições

granulométricas de cada mistura asfáltica e as Figura 18, Figura 19 e Figura 20 apresentam as curvas de Fuller escolhidas para cada mistura.

Tabela 12 - Proporções dos agregados nas composições granulométricas (%)

Mistura	Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Areia	Pó de Pedra	Cal	Material fresado
MF0	25%	29%	10%	35%	1%	0%
MF30	2%	21%	9%	37%	1%	30%
MF60	0%	6%	4%	29%	1%	60%

Figura 18 - Curva de Fuller da mistura MF0

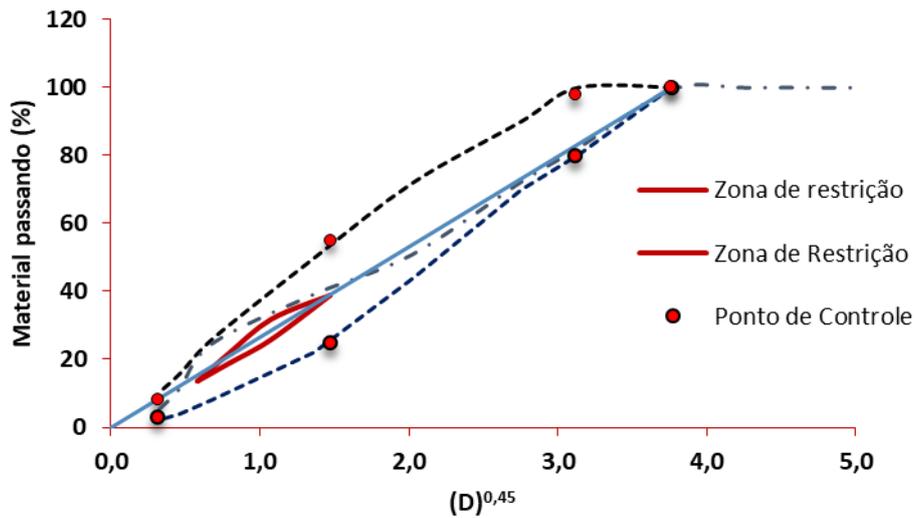


Figura 19 - Curva de Fuller da mistura MF30

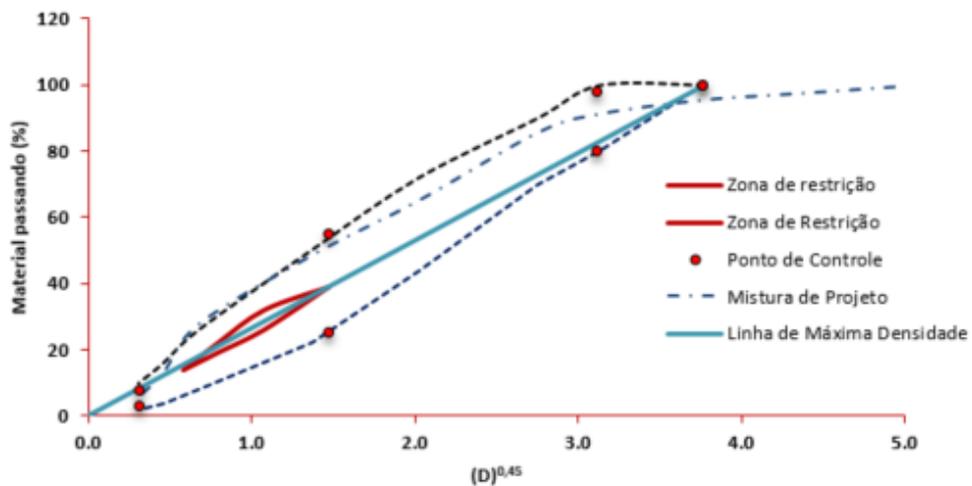
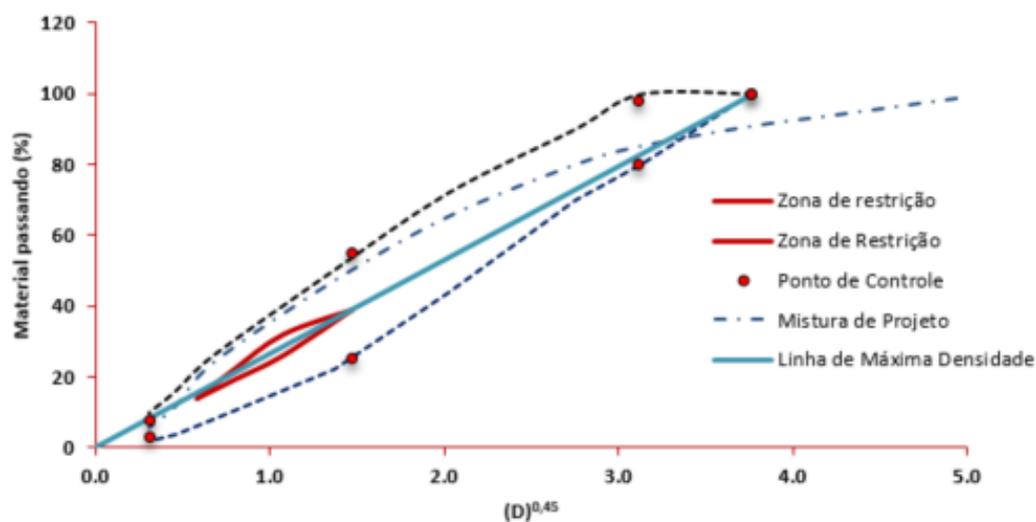


Figura 20 - Curva de Fuller da mistura MF60



A Tabela 13 apresenta o resumo dos parâmetros encontrados após realizada as compactações e o RICE TEST.

Tabela 13 - Resumo da compactação das misturas asfálticas

Misturas	%Ligante	% Gmm Inicial	%Gmm Nprojeto	%Gmm Nmáximo	V _v (%)	VAM (%)
MF0	5,00	88,8	96,1	97,1	3,90	15,3
MF30	5,00	92,8	97,4	97,9	4,05	17,9
MF60	5,00	90,1	93,2	98,2	2,02	14,2
Limites	-	<89,00	96,00	<98,00	4,00	13,0 (mín)

Tendo em vista que o teor de ligante inicial da mistura MF0 e MF30, além de atender os requisitos, gerou um volume de vazios muito próximo de 4%, adotou-se esse teor como teor ótimo de ligante para essas misturas. Assim, foi realizado a compactação de mais 2 CPs dessa mistura para a confirmação dos parâmetros volumétricos.

Para a mistura MF60 foi necessário um novo teste com variações de teores de CAP. Com os parâmetros volumétricos dos corpos de prova moldados para a mistura MF60 com os novos teores, foi possível determinar seus parâmetros volumétricos (Tabela 14).

Tabela 14 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante da mistura MF60

	3,0 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %	Valores Normalizados
V _v (%)	6,78	5,37	3,51	2,62	4,0%
VAM (%)	18,99	18,20	17,06	17,12	13,00 (mín.)
Gmm (%)	93,22	94,63	96,49	97,38	96,0
RBV (%)	78,30	77,68	76,69	77,00	65 a 75 %

Nenhum dos teores testados obteve volume de vazios igual a 4%, diante disso foi realizado uma nova tentativa por meio do gráfico volume de vazios x teor de ligante (Figura

21) onde foi observado que para um volume de vazios de 4,0% o teor de ligante de projeto ideal seria 3,8%. Portanto, uma mistura MF60 com esse teor de ligante foi produzida e os resultados são apresentados na Tabela 15. Dessa maneira, devido a correspondência dos parâmetros da mistura com os parâmetros estabelecidos pela norma, o teor de ligante de projeto para a mistura MF60 foi de 3,8%.

Figura 21 - Determinação do teor de projeto da mistura MF60

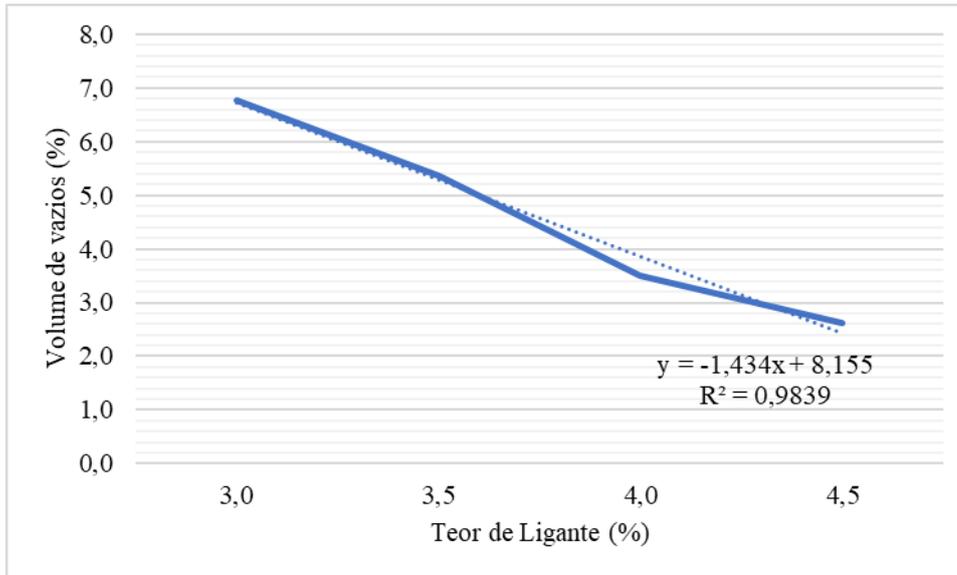


Tabela 15 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de ligante da mistura MF60

Ligante (%)	% Gmm	VAM (%)	RBV (%)	Vv (%)
3,8	96,29	17,27	75,91	3,91
Limites	96,0	13,0 (mín.)	65 a 75	4,0

3.2.5 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Nesta etapa foram realizados os ensaios mecânicos para as misturas estudadas na pesquisa (MF0, MF30 e MF60). A determinação das propriedades mecânicas tem como objetivo verificar a influência da substituição de material virgem por material fresado, assim como analisar a interferência da adição do óleo vegetal residual no desempenho mecânico das misturas asfálticas. O Quadro 5 mostra os ensaios realizados e suas respectivas especificações.

Quadro 5 - Ensaio mecânicos e suas especificações

Ensaio	Metodologia
Resistência à tração por compressão diametral	DNIT-ME 136/2010
Dano por umidade induzida – Lottman modificado	DNIT-ME 180/2018
Flow Number	DNIT-ME 184/2018
Módulo de resiliência	NBR 16018/2011
Módulo dinâmico	AASHTO TP 79/2016

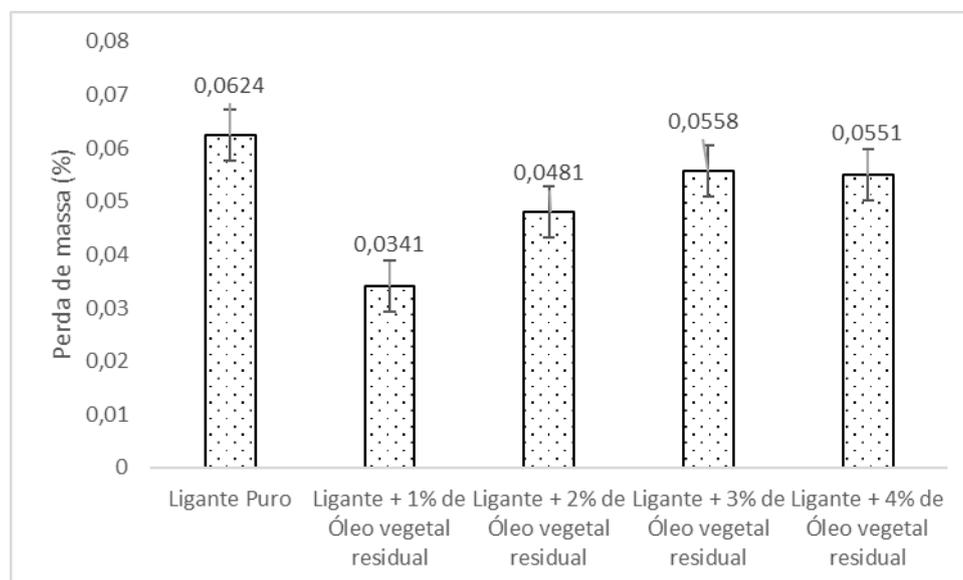
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticos

4.2 Variação de massa

Na Figura 22 são apresentados os valores das variações de massa dos ligantes asfálticos puro e modificados com óleo vegetal residual após o procedimento de envelhecimento à curto prazo. De acordo com a norma DNIT - ME 095/2006 essa variação não deve ser superior a 0,5%, logo todas as amostras em estudos estão dentro deste padrão.

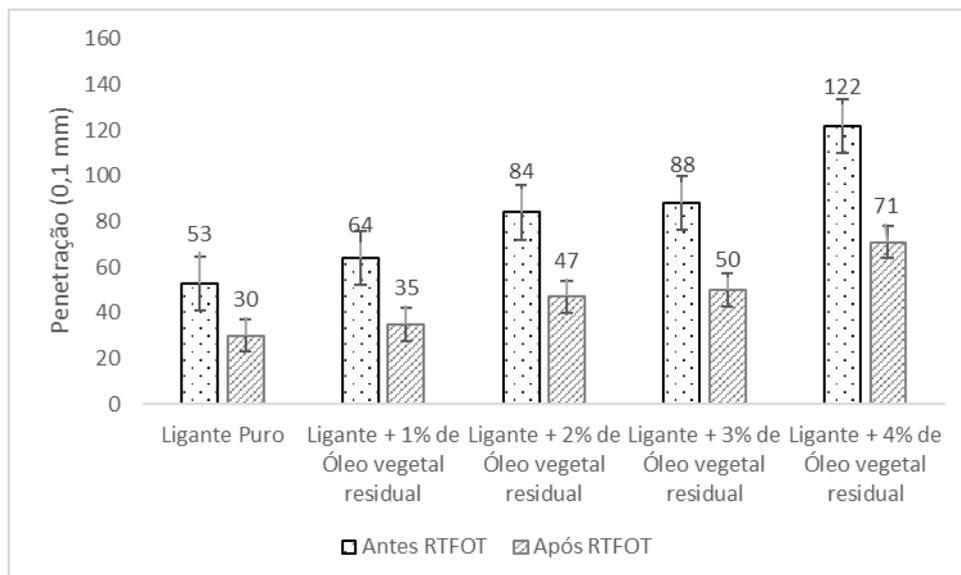
Figura 22 - Variação de massa após RTFOT



4.2.1 Ensaio de Penetração

Na Figura 23 é apresentado os resultados de penetração encontrados para os ligantes estudados, tanto antes como após o procedimento RTFOT. O aumento dos valores de penetração após a incorporação do óleo é esperado pois, esse aditivo age de maneira direta na diminuição da viscosidade.

Figura 23 - Ensaio de Penetração



Guerra (2019) analisou a adição de óleo de canola no ligante asfáltico em diferentes teores e observou o mesmo padrão encontrado nesta pesquisa, aumento da penetração comparada ao ligante asfáltico puro, indicando uma redução da rigidez. Após o procedimento de envelhecimento a curto prazo a autora também observou uma redução significativa da penetração. Resultados similares a esse foram encontrados no estudo Portugal *et al.* (2017) com a adição de óleo de soja ao ligante asfáltico, Carvalho (2018) com a incorporação de óleo de girassol, de Lucena *et al.* (2018) com a incorporação do óleo de moringa, e Luz *et al.* (2019) com adição de óleo vegetal novo e residual.

Todos os ligantes estudados mostraram um aumento da penetração, esse acréscimo se mostrou crescente à medida que também aumentava-se a quantidade de óleo vegetal residual. Essa tendência também foi conferida após o processo de RTFOT. No entanto, o teor de 1% mostrou uma maior sensibilidade ao processo de envelhecimento, que pode ser percebido com o valor da penetração retida (Tabela 16). De acordo com a especificação do DNIT – ME 095/2006 esse parâmetro deve ser no mínimo 55%, sendo assim apenas o ligante modificado com 1% de óleo não foi satisfatório.

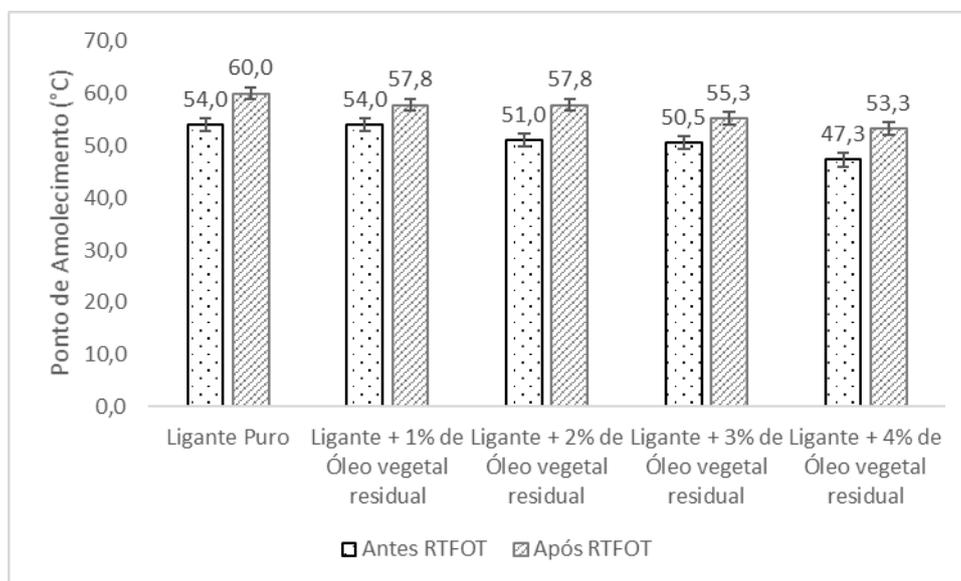
Tabela 16 - Penetração Retida

Amostra	Ligante Puro	Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	Ligante + 4% de Óleo vegetal residual
Penetração Retida (%)	56,6	54,7	56,0	56,8	58,2

4.2.2 Ensaio de Ponto de amolecimento

Para o ensaio de ponto de amolecimento foram encontrados os valores mostrados na Figura 24, onde houve uma tendência de redução das temperaturas e essa diminuição foi crescente à medida que se adicionou mais óleo vegetal residual.

Figura 24 - Ensaio de Ponto de Amolecimento



Esse parâmetro está ligado à manutenção das propriedades do ligante asfáltico a altas temperaturas e ao aumento da resistência à deformação permanente. De acordo com a resolução da ANP n°19/2005 a temperatura mínima para um CAP 50/70 deve ser de 46°C, apesar dessa normativa não se aplicar para ligantes modificados é interessante observar que todos os ligantes estudados apresentam valores superiores ao mínimo. Para os valores após o processo de envelhecimento também foi verificada uma redução gradativa das temperaturas com o acréscimo do óleo vegetal residual.

Segundo Portugal *et al.* (2017), que também verificou uma redução do ponto de amolecimento em ligantes modificados com óleo de soja, essa diminuição pode alterar o comportamento das misturas quando empregada em campo, porque provoca uma sensibilidade do ligante ao aumento das temperaturas do pavimento. Para Silva (2016) essa redução da temperatura com adição de óleo vegetal provoca uma diminuição de resistência do ligante e ganho de trabalhabilidade da mistura que, a depender da situação, pode ser considerado um ponto positivo, como no caso do uso desse ligante em misturas com elevada rigidez.

A norma do DNIT – ME 95/2006 indica que após o processo de envelhecimento à curto prazo a variação do ponto de amolecimento não deve ser superior à 8°C quando

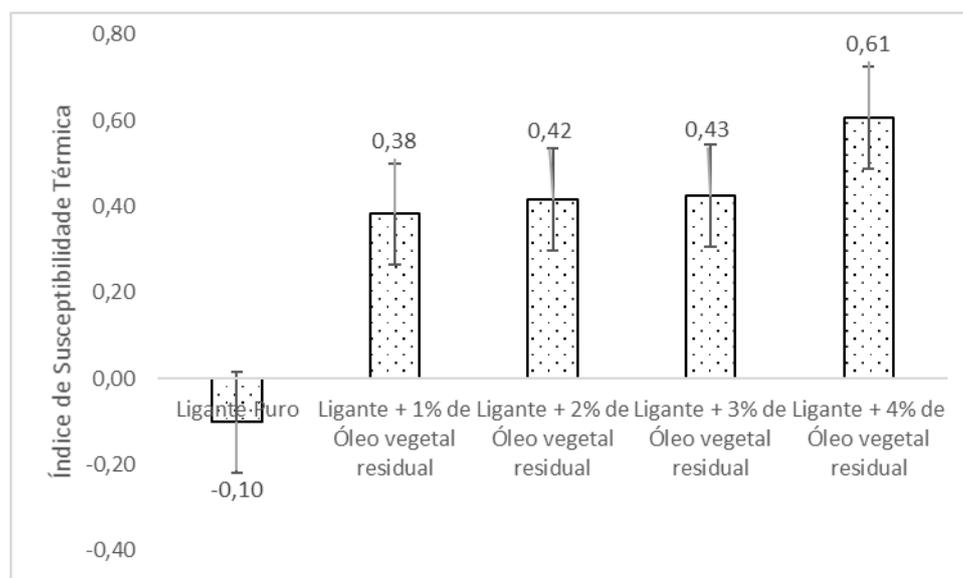
comparado ao ligante antes do RTFTO. A Tabela 17 mostra esses aumentos de temperatura onde todos ficaram dentro do permitido por norma.

Tabela 17 - Aumento de temperatura após o RTFOT

Amostra	Ligante Puro	Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	Ligante + 4% de Óleo vegetal residual
Aumento de temperatura (°C)	6,0	3,8	6,8	4,8	6,0

Há uma relação entre os parâmetros de penetração e ponto de amolecimento, onde um sinaliza rigidez da mistura e o outro a suscetibilidade da amostra a mudanças de temperatura, diante disso pode ser calculado o índice de suscetibilidade térmica (IST) que irá indicar a sensibilidade do ligante à variação de temperatura (Figura 25).

Figura 25 - Índice de Susceptibilidade Térmica



De acordo com a resolução nº19/2005 da ANP uma faixa é definida para o IST de ligantes sem modificações entre -1,5 a +0,7. Para Bernucci *et al.* (2008) valores superiores a +1 indicam ligantes asfálticos oxidados, pouco sensíveis a altas temperaturas e quebradiços em temperaturas menores, já valores menores que -2 sinalizam ligantes muito suscetíveis à mudança de temperatura. Assim de acordo com a Figura 25, todos os ligantes se enquadram em ambas as faixas supracitadas.

4.2.3 Ensaio de Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional foi realizado para o ligante puro e para os ligantes modificados com óleo vegetal residual, antes e após o procedimento de envelhecimento à

curto prazo. As Figura 26 e Figura 27 mostram os resultados do ensaio de viscosidade rotacional com as amostras estudadas, antes e após RTFO, respectivamente. Todos os valores encontrados nesse ensaio atenderam às exigências mínimas exigidas na especificação do DNIT 095/2006.

Figura 26 – Viscosidade rotacional antes RTFOT

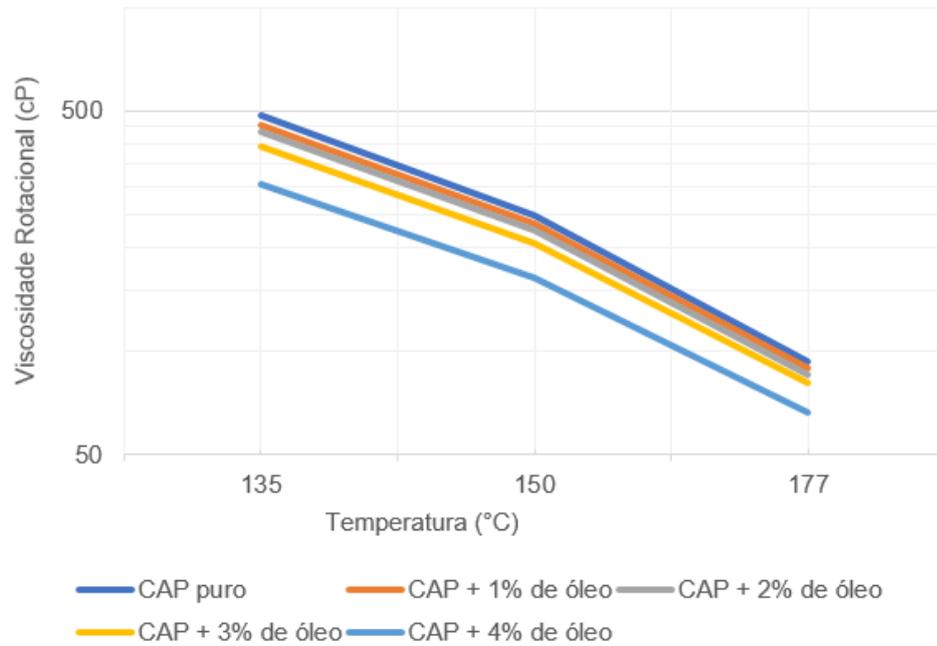
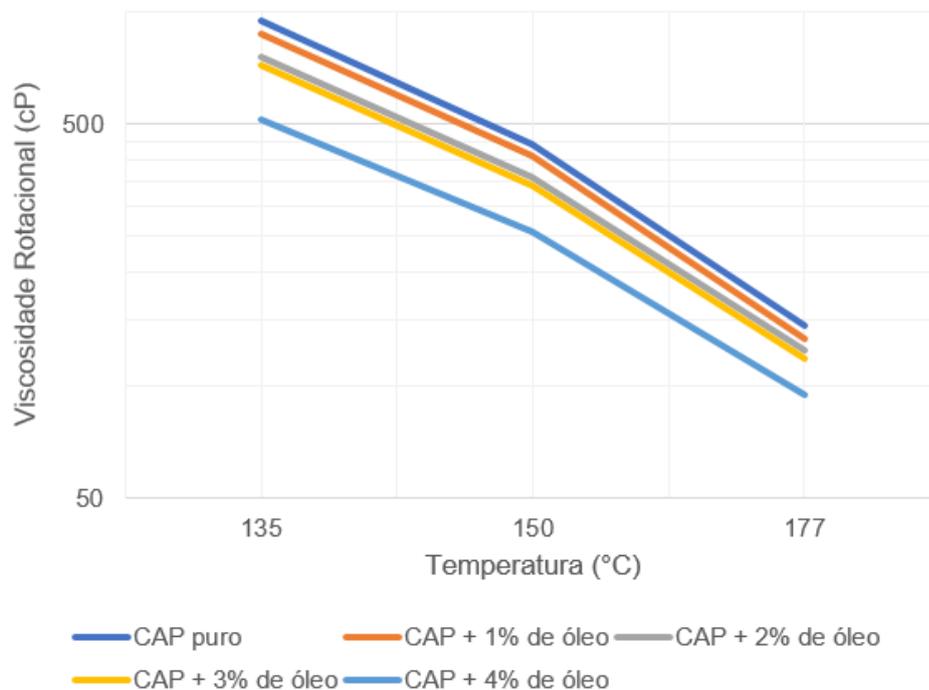


Figura 27 – Viscosidade rotacional após RFTOT



Foi verificada uma diminuição da viscosidade do ligante, tanto antes como após o processo de envelhecimento diante o aumento da quantidade de óleo vegetal residual adicionado. A menor viscosidade apresentada pelo ligante modificado acontece para o maior teor de óleo (4,0%). Este comportamento mostra uma tendência de redução nas temperaturas de usinagem e compactação. Portugal *et al.* (2017) ao adicionar óleos de soja e milho, novo e residual em diferentes teores, também encontrou essa tendência de redução.

Por meio dos valores das viscosidades foi possível determinar as temperaturas de usinagem e compactação para as misturas asfálticas, que estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Temperaturas de usinagem e compactação

Temperatura (°C)	Ligante Puro	Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	Ligante + 4% de Óleo vegetal residual
Usinagem	162,0	160,0	159,0	156,0	149,0
Compactação	146,0	144,0	143,0	140,0	135,5

A maior variação de temperatura ocorreu entre o ligante asfáltico puro e aquele com adição de 4,0% de óleo vegetal residual, chegando a reduzir 13°C na temperatura de mistura e 10,5°C na temperatura de compactação. Essa redução foi se tornando mais significativa à medida que houve aumento da quantidade de óleo vegetal residual adicionado.

De acordo com a pesquisa feita por Souza (2012) onde o ligante asfáltico foi modificado com óleo de mamona, o teor de 5,0% reduziu a viscosidade do ligante, e conseqüentemente, proporcionou uma diminuição das temperaturas de usinagem e compactação em média de 8°C.

Mesmo que a adição de valores menores de óleo vegetal residual não tenha proporcionado reduções significativas nas temperaturas, ele pode apresentar outras vantagens, como o aumento da lubricidade do ligante asfáltico e reposição de compostos aromáticos (CARVALHO, 2018). Além disso, esse aditivo pode melhorar a trabalhabilidade da mistura asfáltica após a adição de material fresado, ponto importante para os objetivos dessa pesquisa.

4.2.4 Performance Grade

A Figura 28 mostra as temperaturas de PG determinadas nas amostras de ligante asfáltico puro e com os ligantes modificados com óleo vegetal residual, e na Figura 29, o índice de envelhecimento deste ensaio. Para esse ensaio foi determinada apenas a temperatura de máxima, pois, grande parte do território brasileiro é de clima tropical, sobretudo a região do Nordeste, possuindo temperaturas médias superiores à 25°C. A determinação da temperatura de PG seguiu as especificações SUPERPAVE, onde $G^*/\text{sen}\delta$, é superior a 1,0 kPa antes do processo de envelhecimento a curto prazo e superior à 2,2 kPa após o RTFOT.

De acordo com a metodologia SUPERPAVE estes valores são capazes de fornecer adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes ligadas ao ligante asfáltico.

Figura 28 - Performance grade

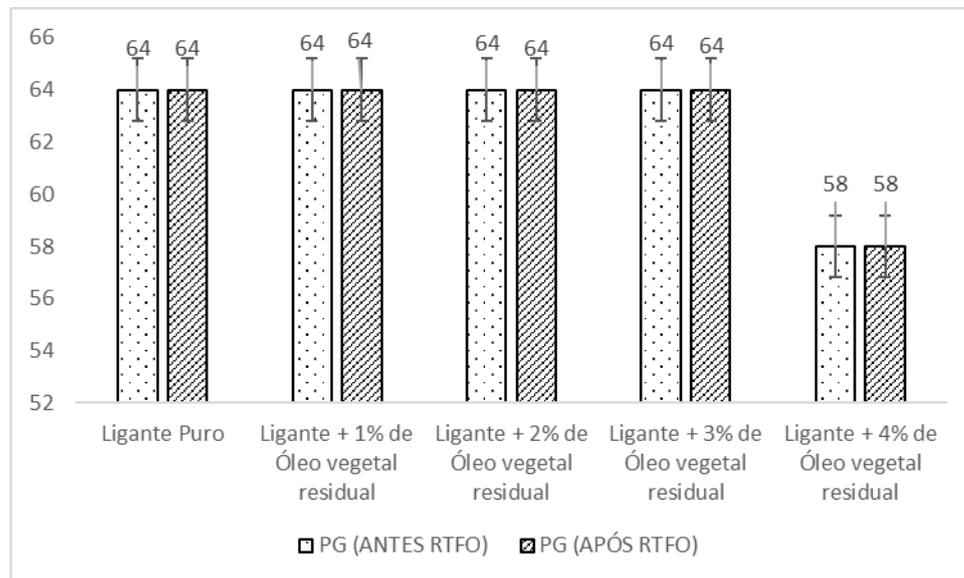
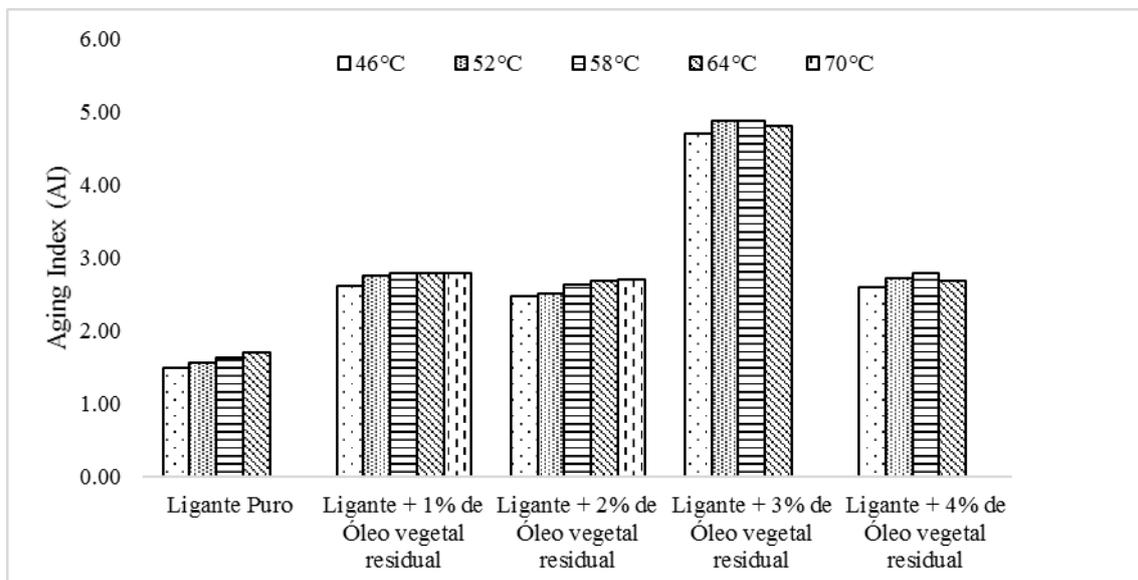


Figura 29 – Índice de envelhecimento do ensaio de PG



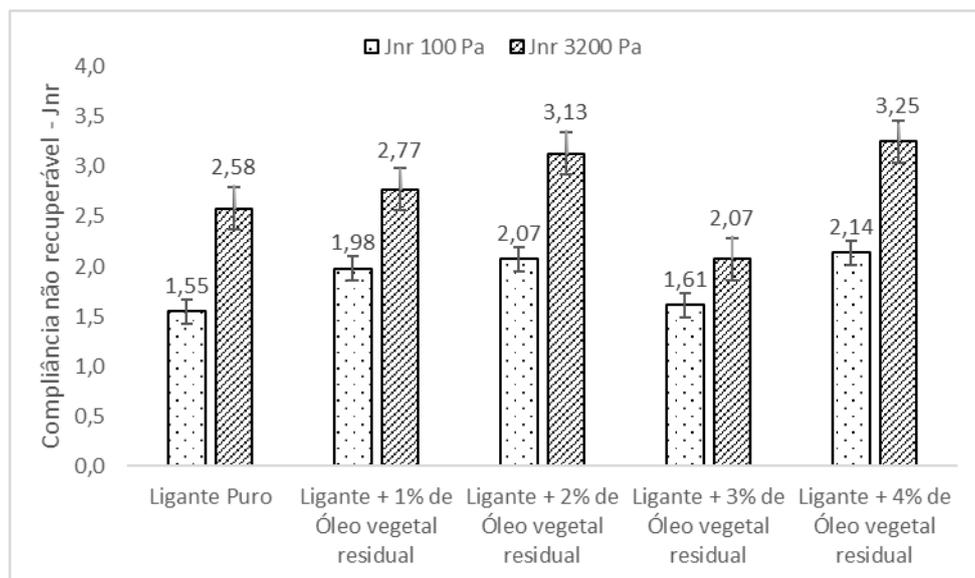
Os resultados mostram uma redução na temperatura para o teor de 4% de óleo vegetal residual. Segundo Lei (2015) esta diminuição pode ser positiva em relação à redução da rigidez, pois quanto menor for esse parâmetro menor será o *stress* térmico do ligante quanto a mudança de temperatura, o que pode reduzir o risco de fissuração do pavimento. No entanto, tem-se que a redução da temperatura do PG deixa o ligante mais susceptível a deformações permanentes e merece atenção especial no Brasil devido a suas elevadas temperaturas.

Após o procedimento de envelhecimento à curto prazo os ligantes estudados permaneceram com a mesma temperatura, com parâmetro $G^*/\sin\delta$ duas vezes mais elevado que antes do processo. Segundo Luz (2019) essa situação indica que o aditivo agiu como agente rejuvenescedor, protegendo o ligante da oxidação e/ou volatilização dos compostos químicos do ligante e aumentando a resistência do ligante ao envelhecimento.

4.2.5 MSCR

O ensaio de Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) foi realizado na temperatura de PG de cada amostra e possibilitou analisar o percentual de recuperação (%R), da compliância não recuperável (Jnr) e a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis. Os resultados para o parâmetro de compliância não recuperável (Jnr) estão representados na Figura 30.

Figura 30 - Compliância não recuperável - Jnr



D'angelo *et al.* (2007) explicam que o Jnr é usado na análise das propriedades reológicas de ligantes modificados submetidos a altas temperaturas, relacionando este parâmetro à deformação permanente do ligante. Valores elevados de Jnr indicam alta suscetibilidade do ligante à deformação permanente, enquanto que menores valores sugerem maior resistência do ligante a este defeito. Analisando os resultados dos ligantes estudados a modificação com o óleo vegetal residual aumentou esse parâmetro quando comparado ao ligante puro. Segundo a AASTHO M320 (2016) pode-se usar o valor de Jnr a 3200 Pa para avaliar o volume de tráfego em: tráfego padrão, pesado, muito pesado e extremamente pesado Tabela 19.

Tabela 19 - Classificação de volume de tráfego baseado no valor de Jnr à 3200 Pa

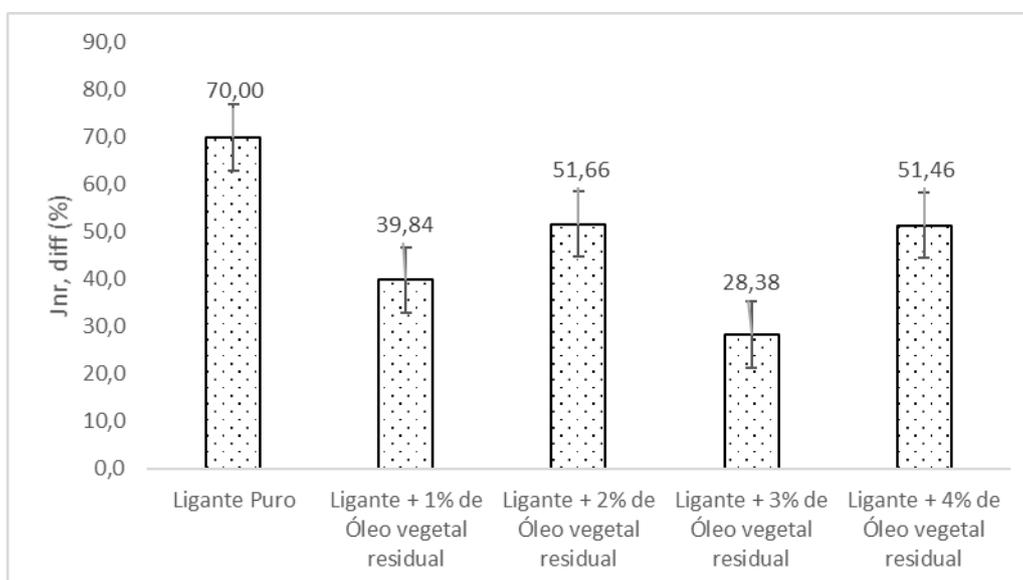
Propriedade	Máx.	Tipo de tráfego	Número de passadas de um eixo padrão
Jnr à 3200 Pa	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
	1,0	Muito pesado (V)	> 30 milhões
	0,5	Extremamente pesado (E)	> 100 milhões

Fonte: AASTHO M320, 2016.

Apesar de um aumento nos valores de Jnr a 3200 Pa dos ligantes modificados com o óleo vegetal residual, todas as amostras estudadas são classificadas como Padrão (S), inclusive o ligante asfáltico puro, logo, apesar da adição do óleo vegetal residual não aconteceu alterações nessas classificações.

Sobreiro (2014) aborda a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis a 100 Pa e a 3.200 Pa (Jnr,diff) e cujo limite não deve ultrapassar 75%, pois dessa maneira é garantido que o material não seja altamente sensível a alterações nos níveis de tensão e propensos ao surgimento de deformações permanentes. Assim, os percentuais encontrados estão apresentados na Figura 31.

Figura 31 - Jnr, diff

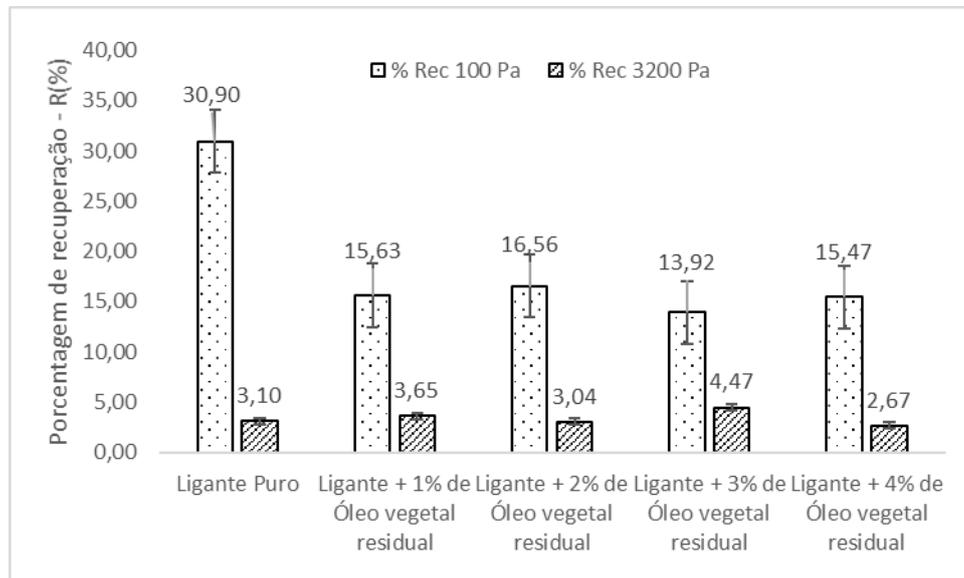


Os resultados mostraram que nenhuma amostra superou esse limite de 75%. A amostra que mostrou o valor mais elevado desse parâmetro foi o ligante asfáltico puro, mostrando ser a mistura mais sensível à variação do nível de tensão aplicado.

Outro parâmetro estudado por meio do ensaio de MSCR é a porcentagem de recuperação da amostra durante o tempo de 9 segundos de aplicação de carga para os ciclos de tensão de 100 Pa e 3200 Pa que indica a capacidade de retorno elástico da amostra após ser

submetida a períodos de tensão e relaxamento. A Figura 32 mostra os resultados com o ligante puro e com os ligantes modificados com óleo vegetal residual.

Figura 32 - Porcentagem de recuperação



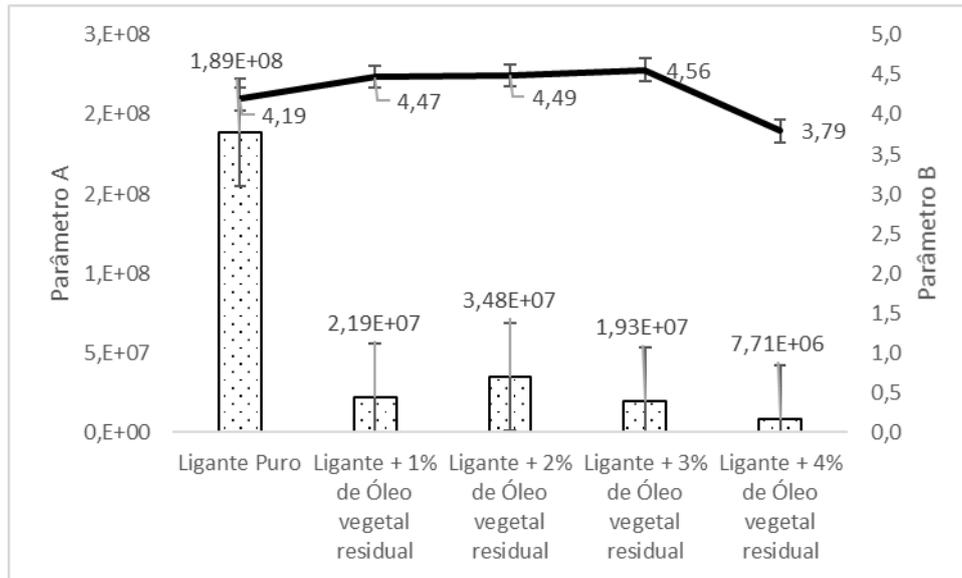
Segundo Domingos & Faxina (2015) percentuais de recuperação maiores podem ser traduzidos como uma parcela maior de deformação recuperável em relação ao total sofrido pelo material após cada ciclo de fluência e de recuperação (o acúmulo de deformação plástica é menor), o que é favorável à resistência à deformação permanente. Quanto mais baixos forem os valores de J_{nr} , traduzem como uma suscetibilidade menor do ligante à deformação permanente em campo, ou seja, há um aumento da contribuição do ligante na resistência da mistura asfáltica à deformação permanente.

Com isso os resultados menores do percentual de recuperação para os ligantes modificados em relação ao ligante puro corroboram com os valores encontrados para o J_{nr} , mostrando que de acordo com esses parâmetros os ligantes modificados são mais susceptíveis a deformação permanente do que o ligante puro.

4.2.6 LAS

Na Figura 33 estão apresentados os resultados dos parâmetros “A” e “B” obtidos para cada amostra ensaiada no ensaio de Varredura Linear de Amplitude de Deformação - LAS.

Figura 33 - Parâmetros A e B



Dado que o parâmetro A está relacionado à mudança da integridade do material provocada pelo dano acumulado, valores maiores de A significam que a amostra manteve sua integridade inicial. Desta maneira, pode-se analisar que todas as amostras com ligante modificado com óleo vegetal residual apresentaram resultados inferiores em relação ao ligante puro.

Para o parâmetro “B”, Kodrat *et al.* (2007) indicam que maiores valores absolutos desse parâmetro indicam que a vida de fadiga do material decresce a uma taxa maior quando a amplitude de deformação aumenta, do mesmo modo, menores valores absolutos de “B” indicam que a vida de fadiga do ligante decresce a uma taxa menor quando a amplitude de deformação aumenta. Nesse estudo foi verificado que a amostra com 4% de óleo vegetal residual apresentou o menor resultado desse parâmetro. Os demais óleos modificados mostraram resultados um pouco superior que o ligante asfáltico puro.

A análise do parâmetro B, que está relacionado à inclinação da reta da frequência versus módulo de armazenamento (G''), demonstrou que a modificação do ligante nos teores de 1, 2 e 3% aumentou os valores de “B” indicando aumento da sensibilidade à variação do nível de deformações no ligante asfáltico, o que não é positivo para os ligantes asfálticos, já que indica maior suscetibilidade a deformações sob variações de temperaturas.

Por meio do princípio do dano contínuo viscoelástico (VECD) é permitido a elaboração de um modelo de fadiga que proporciona a obtenção de informações sobre o comportamento do ligante asfáltico com relação ao dano em temperaturas intermediárias, para uma ampla faixa de deformações e de ciclos de carregamentos (HINTZ, 2012). Pode-se dizer que o número de ciclos até a falha (N_f) está relacionado ao volume de tráfego suportado pelo

material em função das deformações aplicadas, que é um indicador da estrutura do pavimento, ou das deformações admissíveis no pavimento. Isto representa as condições que o material pode ser submetido, segundo Nuñez *et al.* (2014).

Como forma de estabelecer uma relação da vida de fadiga do ligante no ensaio LAS com parâmetros de campo, Teymourpour e Bahia (2014) propuseram calcular o parâmetro Nf em diferentes níveis de deformação. A Figura 34 e a Tabela 20 apresenta a estimativa da vida de fadiga do ligante puro e dos ligantes modificados.

Figura 34 – Estimativa da vida de fadiga para os ligantes puro e modificados

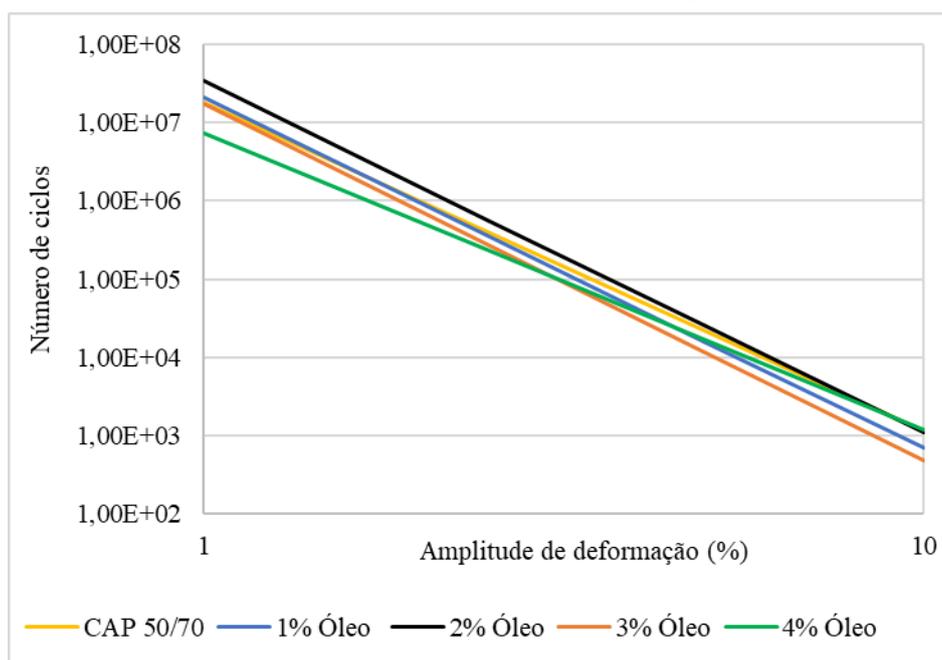


Tabela 20 - Valores estimados para vida de fadiga dos ligantes puro e modificados

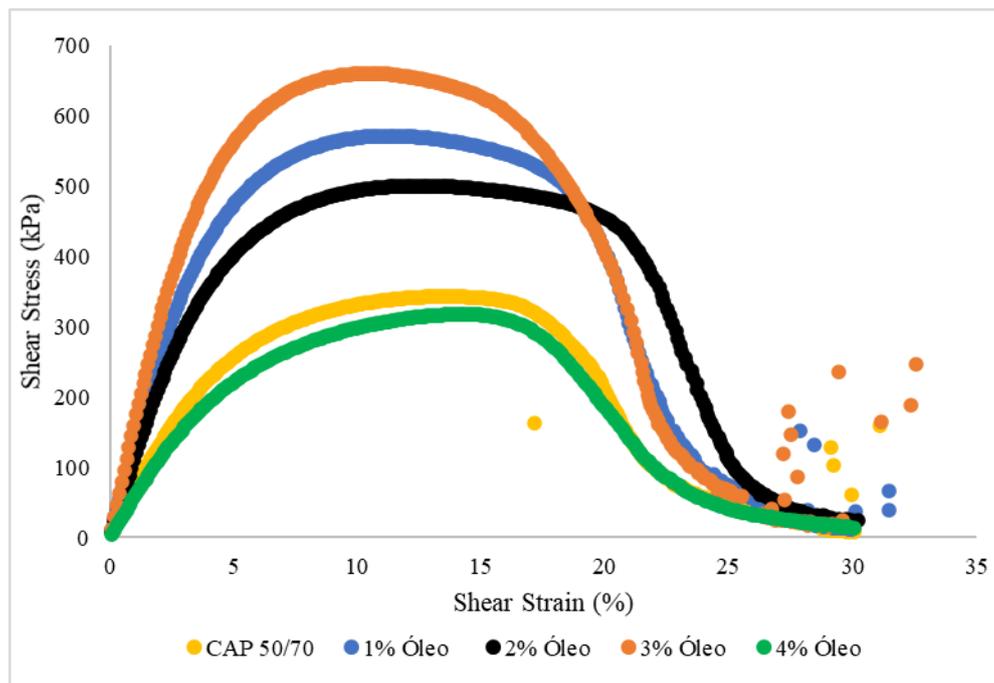
Amplitude de deformação (%)	1,0	2,5	5,0	10,0
Ligante Puro	18.097.624	387.819	21.188	1.158
Ligante Puro + 1% Óleo vegetal residual	17.770.412	345.060	15.549	701
Ligante Puro + 2% Óleo vegetal residual	34.111.057	555.762	24.678	1.096
Ligante Puro + 3% Óleo vegetal residual	17.251.407	264.118	11.189	474
Ligante Puro + 4% Óleo vegetal residual	7.401.216	229.427	16.573	1.197

Para os valores encontrados é possível perceber que o teor de 2% apresentou melhores resultados que o ligante puro em amplitudes menores. Os demais teores apresentam

desempenho inferior do que o ligante sem modificação. Por fim, a análise da resistência ao dano de ligantes asfálticos por meio do princípio do dano contínuo viscoelástico (VECD) demonstrou que existe uma forte dependência entre a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos e o nível de deformação, como foi observado por Gama (2016) e Singh *et al.* (2017).

A Figura 35 mostra os gráficos de tensão versus deformação obtidos no ensaio LAS sob deformação controlada para os ligantes em estudo.

Figura 35 - Curvas de tensão deformação

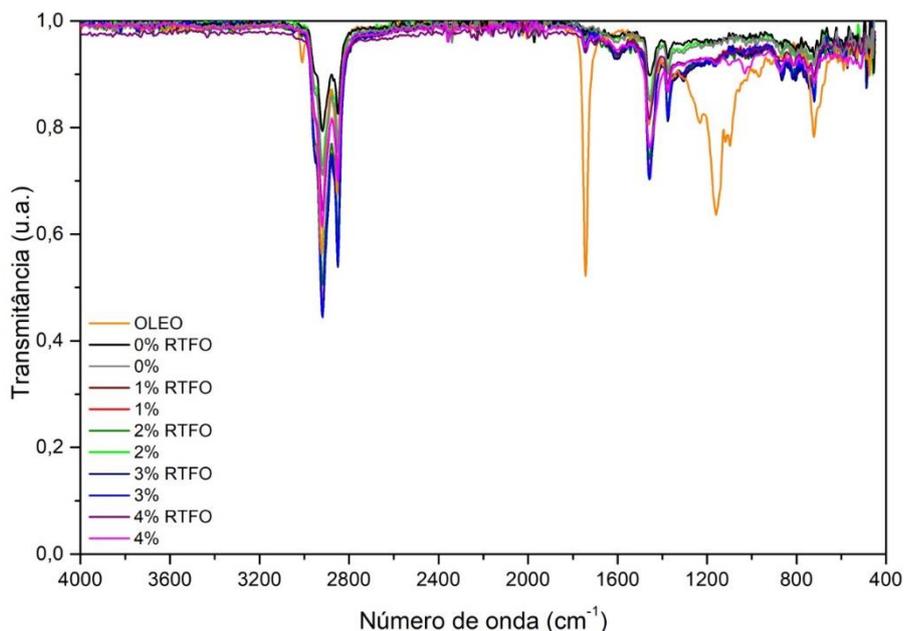


As curvas indicaram que apenas o ligante asfáltico modificado com 4% suportou tensões de cisalhamento inferiores que o ligante asfáltico puro. Também é possível observar que as curvas dos teores de 3 e 4% mostraram seus máximos entre as amplitudes de 15 e 20% com um padrão semelhante de tensão/deformação. Para o teor de 2% a curva apresentou valores máximos em uma faixa maior de amplitude de deformação em comparação aos outros ligantes analisados.

4.3 Propriedades químicas dos ligantes asfálticos

O ensaio de FTIR foi realizado para as amostras de ligante puro e modificados nas proporções de 1, 2, 3 e 4%, antes e após RTFO. Os espectros obtidos para estas amostras estão contidos na Figura 36.

Figura 36- Espectros de FTIR para as amostras de ligantes asfálticos



Foi observado espectros dos ligantes com perfis semelhantes para todas as amostras, tanto antes como após o processo RTFOT. Não foi encontrado pico com intensidade relevante nas regiões entre 1760 e 1700 cm^{-1} (C=O, estiramentos de carbonilas) ou entre 1250 e 1050 cm^{-1} (C-O) que possa indicar de oxidação devido o procedimento de envelhecimento à curto prazo. Outra região em que não foi encontrado algum sinal indicativo de funções oxigenadas foi entre 3100 e 3600 cm^{-1} , relativo à vibração em grupos OH.

Quanto à caracterização do ligante, os principais sinais indicativos da sua composição estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos, sendo estas caracterizadas por picos de alta intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3000 e 2800 cm^{-1} . Nesta faixa foram encontrados picos em 2951 cm^{-1} e 2867 cm^{-1} , para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metila ($-\text{CH}_3$) e picos em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} , para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metileno ($-\text{CH}_2-$), além de um pico em 2890 cm^{-1} para estiramento de grupos metina ($-\text{CH}-$), parcialmente obscurecido pelo 2919 cm^{-1} .

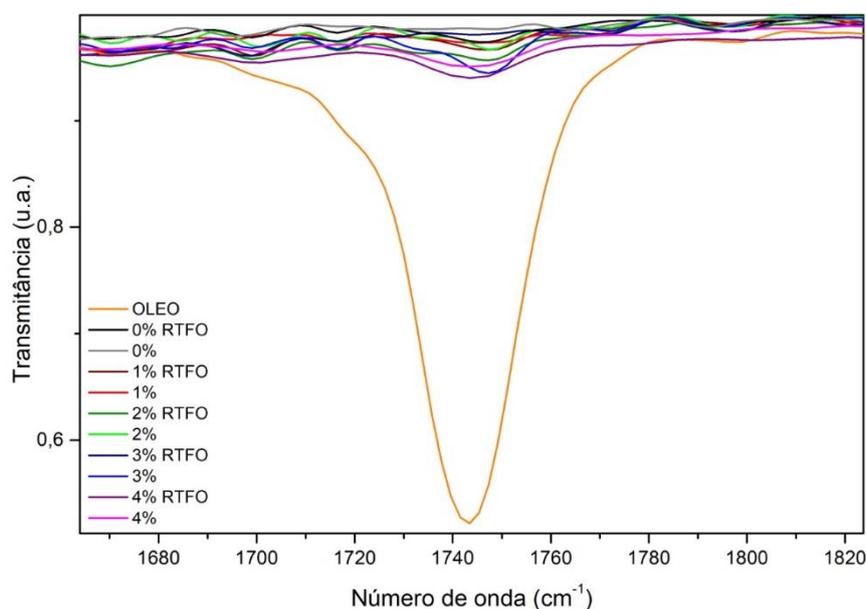
Picos com baixa intensidade foram encontrados entre 2000 e 1700 cm^{-1} , indicando bandas harmônicas para aromáticos substituídos, bem como pequenos picos para grupos carbonilas (C=O) em pequena quantidade entre 1760 e 1700 cm^{-1} . A presença de um pico em

torno de 1600 cm^{-1} é indicativo de insaturações (C=C) em anéis, juntamente com picos em torno de 1478 cm^{-1} , sendo este último geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) em 1455 cm^{-1} . O aparecimento deste último está em conformidade com os picos deste grupo para deformação axial (2921 e 2850 cm^{-1}), enquanto que o pico em 1373 cm^{-1} , referente a deformação angular em grupos metila ($-\text{CH}_3$), está em conformidade com picos de deformação axial em 2952 e 2869 cm^{-1} .

O espectro para o óleo apresentou alguns picos semelhantes ao do ligante puro em relação a ligações entre carbono e hidrogênio, que são espécies em comum entre as estruturas orgânicas. Neste espectro foi observada a presença de picos entre 2950 e 2870 cm^{-1} , relacionados a grupos metila e metileno (estiramentos assimétricos e simétricos) e em 1461 e 1373 cm^{-1} , para deformação angular destes mesmos grupos metileno e metila, respectivamente. O pico em 1747 cm^{-1} indica estiramento de grupo carbonila, e junto aos picos em 1232 , 1159 , 1119 e 1098 cm^{-1} , para estiramentos assimétricos e simétricos das ligações $-(\text{C}=\text{O})-\text{O}-$, são o indicativo da presença de grupos ésteres na amostra. Esse número de picos em relação as mesmas vibrações estão relacionadas aos diferentes compostos do tipo triacilgliceróis presentes no óleo.

Na Figura 37 é mostrada uma ampliação da área dos espectros, próximos ao pico em 1747 cm^{-1} . Este pico é o maior indicativo da presença de óleo no ligante asfáltico e o aumento da intensidade deste é proporcional à quantidade de óleo. Observa-se que para os diferentes teores, o procedimento RTFOT obteve diferença nas intensidades dos picos, o que indica que o óleo ainda permanece nas amostras, porém há um acréscimo na intensidade desta região do espectro, indicando a presença de outras carbonilas, relacionadas possivelmente à oxidação pós RTFOT.

Figura 37 - Espectro com faixa reduzida para as amostras de ligantes asfálticos



4.4 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram determinadas segundo as sete condições experimentais apresentadas na Tabela 21, de maneira que a partir desta matriz de ensaios foi possível obter uma superfície de resposta contendo as demais combinações entre os diferentes teores de óleo vegetal residual e material fresado.

De acordo com a matriz do estudo para cada uma das sete condições experimentais foram moldados corpos de prova para a realização dos ensaios de Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Lottman Modificado, Flow Number, e Módulo Dinâmico que será apresentado separadamente no final deste capítulo.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios mecânicos na matriz de ensaios do planejamento fatorial

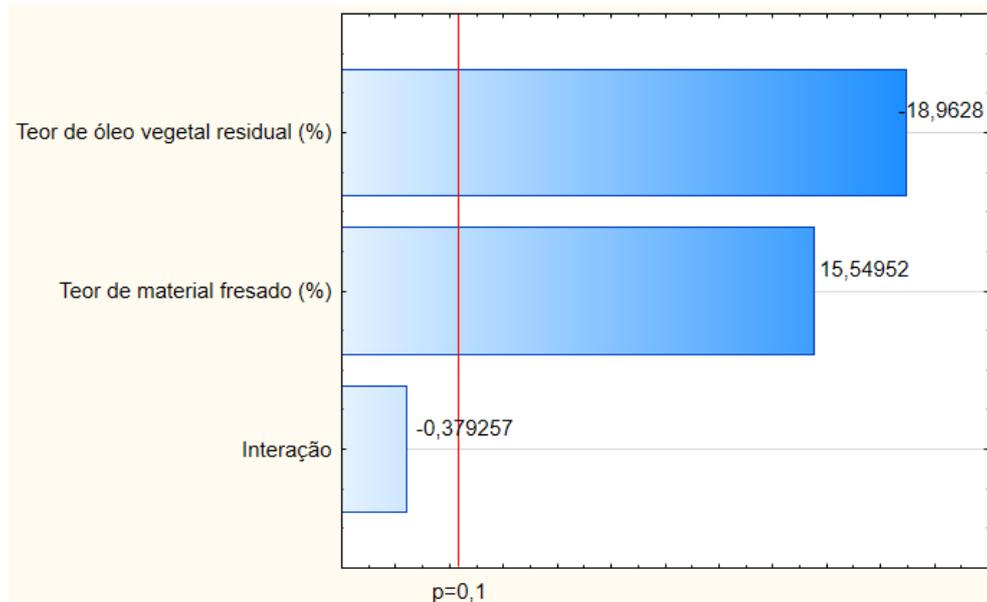
Condição	Teor de óleo vegetal residual (%)	Teor de material fresado (%)	RT (MPa)	MR - NBR (MPa)	Lottman (%)	Flow Number (MPa)
1	0	0	1,17	6997	81%	269
2	4	0	0,68	3507	63%	100
3	0	60	1,59	7272	90%	425
4	4	60	1,08	4961	97%	222
5	2	30	1,14	5143	91%	337
6	2	30	1,10	4108	91%	201
7	2	30	1,09	4713	89%	220

A seguir são apresentadas as superfícies de respostas para cada variável dependente e a análise desses resultados. Todos os gráficos e análises foram obtidos por meio do Software Statistica 7.

4.4.1 Resistência à Tração

O Diagrama de Pareto faz uma comparação quantitativa dos fatores que mais influenciam para determinada ocorrência, neste caso, as variáveis são os teores de óleo vegetal residual e de material fresado e a interação dos dois. A Figura 38 mostra esses resultados para o ensaio de Resistência à Tração. Os efeitos cujos retângulos estiverem à direita da linha divisória devem ser considerados no modelo matemático.

Figura 38 - Diagrama de Pareto para Resistência à Tração



Por meio do Diagrama de Pareto é possível verificar que para o nível de significância de 95%, as duas variáveis indicaram influência significativa, mas a interação entre elas duas não mostrou o mesmo resultado. Ou seja, o teor de óleo vegetal residual e de material fresado ultrapassaram a linha de significância de 10%, sendo que dentre as variáveis, a quantidade de óleo vegetal residual foi o que mais representou contribuição na variabilidade dos resultados, ou seja, influenciou mais na resistência à tração.

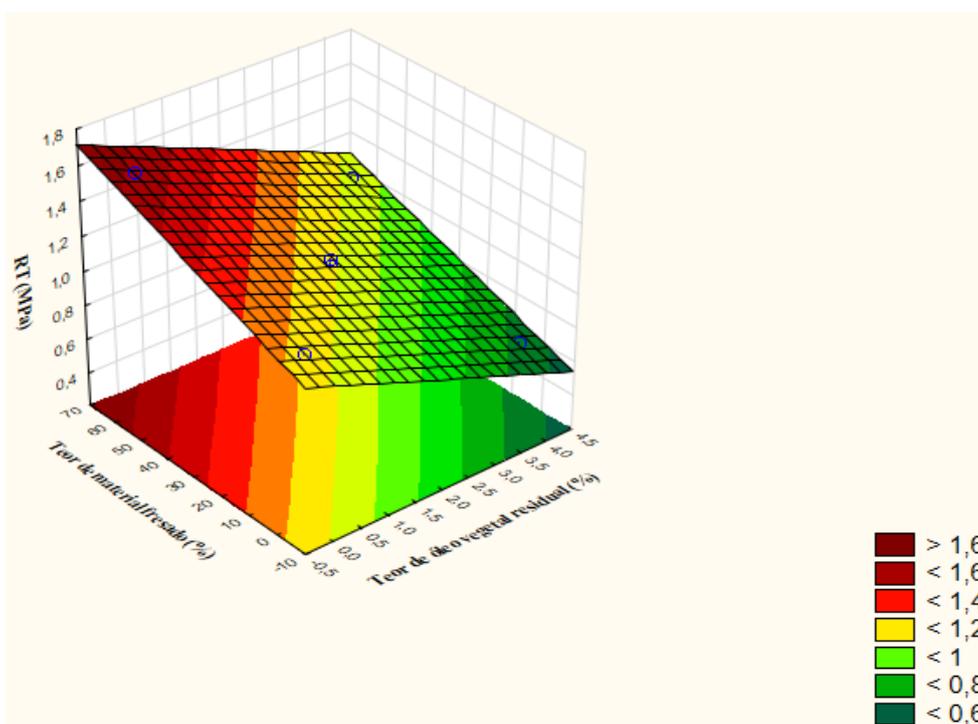
Na Tabela 22 é mostrada a análise de variância (ANOVA) onde o R^2 é o poder de explicação do modelo (%), o F é a significância global do modelo e o valor de P (100-P) é a confiança do modelo. No ensaio de Resistência à Tração atinge o nível satisfatório do coeficiente de determinação para o nível de 10%, o poder de explicação do modelo (R^2) é de 99,5%.

Tabela 22 - ANOVA Resistência à Tração

ANOVA - R ² 0,99504				
Fator	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	F	Valor de P
Teor de óleo vegetal residual (%)	0,250000	1	359,5890	0,000320
Teor de material fresado (%)	0,168100	1	241,7877	0,000578
Interação	0,000100	1	0,1438	0,729750
Erro	0,002086	3		
Total	0,420286	6		

Este fato mostra que é possível prever o comportamento da variável Resistência à Tração por meio dos teores de óleo vegetal residual e de material fresado separadamente, pois a interação desses dois fatores não é significativa para o modelo. Na Figura 39 é apresentada a superfície de resposta do delineamento fatorial.

Figura 39 - Superfície de resposta da Resistência à Tração



Na superfície dos resultados apresentada acima é possível observar que apenas uma pequena parcela das misturas, aquelas com alto teor de óleo vegetal residual, não atendem ao requisito da norma DNIT 136/2010 que preconiza o valor mínimo de RT em 0,65 Mpa para aplicação de camadas de rolamento.

Observando o comportamento da RT em relação somente ao teor de óleo vegetal residual (simulando não ter acréscimo de material fresado) é observada uma acentuada redução da Resistência à Tração com o aumento de óleo adicionado. Pesquisas similares,

como a de Guerra (2019) onde foi adicionado óleo de canola ao ligante asfáltico também apresentou reduções no parâmetro em questão.

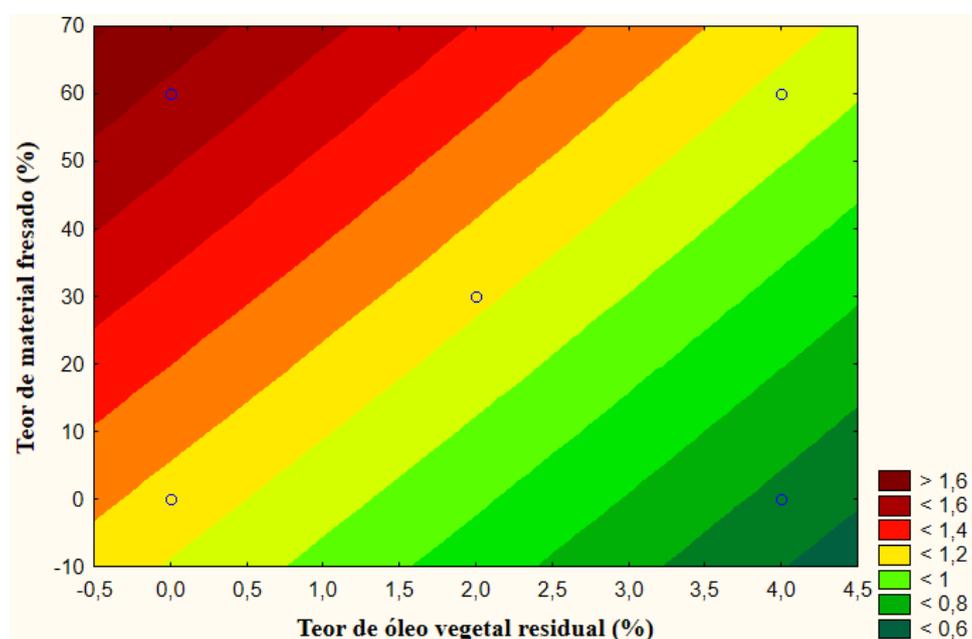
A pesquisa de Carvalho (2018) adicionou óleo de girassol ao ligante asfáltico e também encontrou resultados menores de resistência nos teores de 1, 2 e 3%. No seu estudo, assim como visto nesse, o teor de óleo era inversamente proporcional ao valor de resistência, ou seja, à medida que aumentava o aditivo o valor de RT diminuía. Para a autora isso aconteceu devido à redução das temperaturas de moldagem, pois as amostras do ligante CAP 50/70 foram produzidas sob temperaturas mais elevadas demonstrando valores mais elevados de resistência à tração.

Já em relação ao aumento do material fresado é verificado um aumento da resistência à tração. Esses resultados estão de acordo com a pesquisa de Suzuki (2019) que adicionou material fresado nas porcentagens entre 10 e 65%. A autora verificou que as resistências aumentaram até o teor de fresado atingir 50%, e uma pequena redução constatada no teor de 65%.

Aumentos da resistência podem ser encontrados no estudo de Gama (2013) com adição de polímeros, porém nesse caso esse valor maior da resistência está relacionado ao processo de oxidação que torna o ligante asfáltico mais quebradiço, com ruptura mais frágil. Esse aumento de RT é atribuído a uma quantidade desse ligante oxidado na mistura (ALI *et al.*, 2016).

Outra maneira de verificar a interação entre as variáveis na RT é por meio do gráfico da Figura 40, em que os resultados são apresentados na forma de curvas de nível.

Figura 40 - Curvas de nível para RT

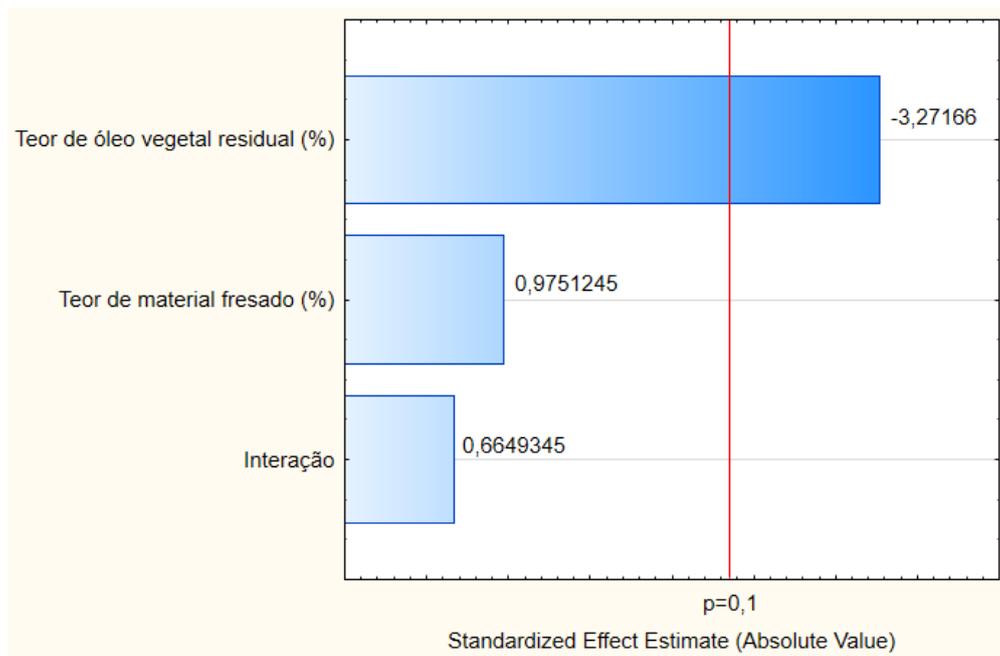


Comparando o valor de RT para o ligante puro nas condições normais, é possível verificar que à medida que a quantidade de óleo aumenta o valor de resistência diminui e em relação ao material fresado acontece o contrário, aumentando o valor de RT à medida que aumenta a quantidade de reciclado. Com relação à interação das duas variáveis, observa-se um aumento da resistência para os níveis de até 3% de óleo vegetal residual e níveis mais altos de fresado. Esse aumento de RT pode indicar uma maior capacidade estrutural nas misturas modificadas e envelhecidas.

4.4.2 Módulo de resiliência

Com relação ao Módulo de Resiliência, foram realizadas análises usando a norma brasileira NBR 16018. Analisando este parâmetro, a variável significativa foi apenas o teor de óleo vegetal residual ao nível de 90% de significância, o que pode ser observado nos Diagramas de Pareto nas Figura 41 para a norma americana e brasileira, respectivamente.

Figura 41 - Diagrama de Pareto para o Módulo de Resiliência



Analisando os diagramas das duas normas é possível observar que na norma brasileira, os parâmetros assim como a interação deles apresenta uma significância maior em relação a normativa americana. E de maneira geral, o teor de óleo vegetal residual tem uma maior influência nos resultados de Módulo de Resiliência do que o teor de material fresado.

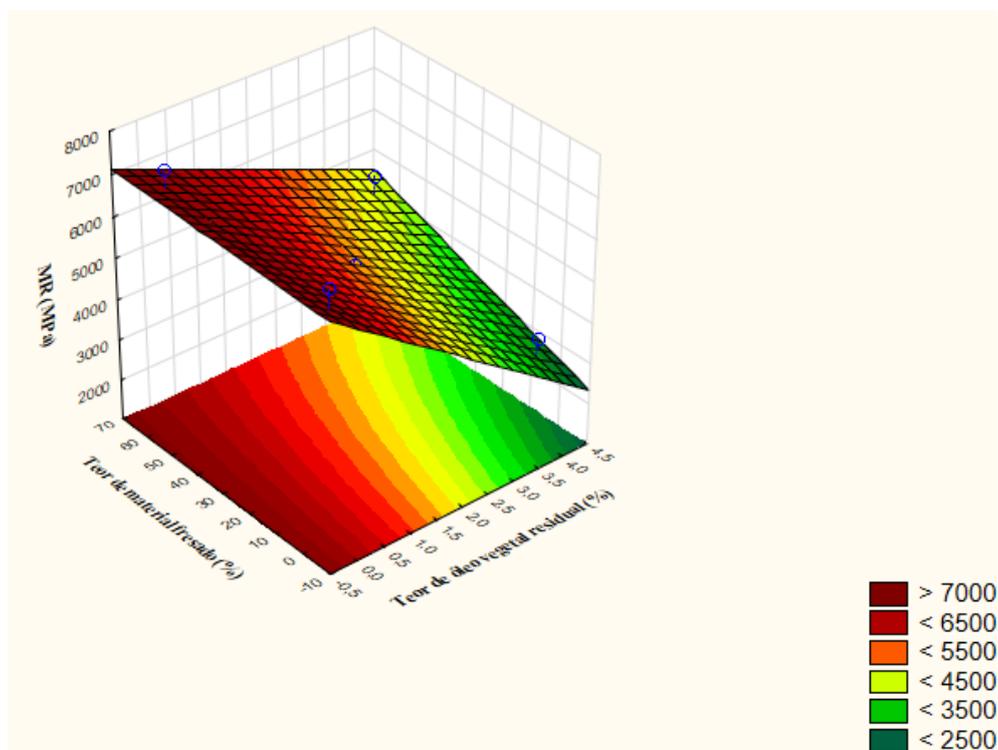
Por meio da ANOVA (Tabela 23) observa-se que 68% das variáveis podem ser explicadas pelo modelo americano enquanto no modelo da norma brasileira as variáveis são explicadas em 80%. É possível observar também que apenas o fator do teor de óleo residual atinge o nível de confiança do modelo, porém a interação não é significativa ao nível de 90%.

Tabela 23 - ANOVA Módulo de Resiliência

ANOVA - R ² 0,80128				
Fator	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	F	Valor de P
Teor de óleo vegetal residual (%)	8412900	1	10,70375	0,046719
Teor de material fresado (%)	747360	1	0,95087	0,401417
Interação	347510	1	0,44214	0,553641
Erro	2357931	3		
Total	11865702	6		

As superfícies de respostas encontradas para a variável Módulo de resiliência usando as duas normas, variando-se o teor de óleo vegetal residual e a quantidade de material fresado é mostrada na Figura 42. De acordo com Bernucci *et al.*, (2008) os valores típicos de MR para as misturas asfálticas à 25°C estão situados na faixa de 2000 a 8000 MPa. Para o ligante puro nas condições de moldagem padrão, em nível de comparação, o módulo encontrado foi de 6997 MPa. Apenas os valores encontrados com pouca quantidade de material fresado e alto teor de óleo vegetal residual ultrapassam o intervalo mínimo citado.

Figura 42 - Superfície de resposta do Módulo de Resiliência (NBR 16018)



Analisando a variável do teor de óleo vegetal residual, o Módulo de Resiliência diminui à medida que aumenta a quantidade de óleo. Fato este que foi observado nos estudos de Pilati (2008) com óleo de xisto, Carvalho (2018) com óleo de girassol e Guerra (2019) com óleo de mamona.

Luz *et al.* (2019) estudaram a influência da redução de 10 e 20°C das temperaturas de referência de usinagem e compactação com ligantes modificados com óleos vegetais novos e residuais, e chegaram à conclusão de que as misturas com redução de 20°C apresentaram uma pequena queda em relação ao MR da mistura de referência.

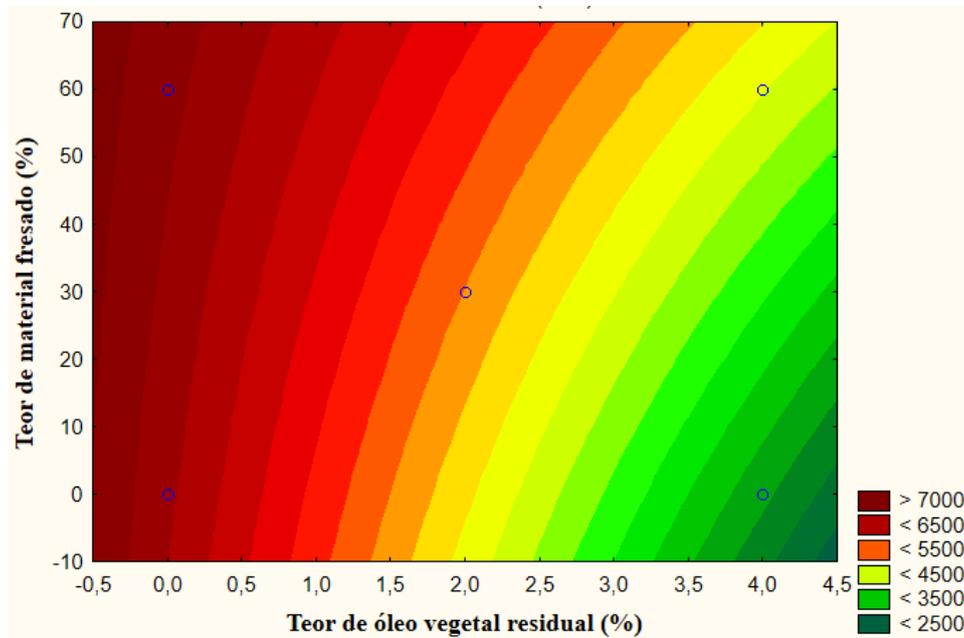
Neste estudo houve uma redução da viscosidade e conseqüente redução das temperaturas de usinagem e de compactação à medida que se aumentou a quantidade de óleo vegetal residual. Para Oliveira (2014) o MR decresce com a redução da temperatura de compactação pois o Módulo de Resiliência diminuiu 18% da mistura de referência para a mistura modificada com temperatura 20°C mais baixa.

Os maiores valores de MR encontrados são com altas quantidades de material fresado, e pouca quantidade de óleo. Esta mesma tendência foi vista por Suzuki (2019) que notou uma diferença de comportamento das misturas com baixos e altos teores de material fresado. A autora observou que apesar de haver um aumento do MR entre as misturas com baixos teores de fresado, esses resultados foram menores em relação à mistura de controle.

A maior rigidez das misturas com altos teores de material fresado pode estar relacionada com a presença do ligante envelhecido. No entanto, o condicionamento do material durante a dosagem, ou seja, o aquecimento do material fresado pode ter influenciado os resultados (CAVALLI *et al.*, 2018). Neste caso, esse aquecimento pode ter provocado a ativação do ligante residual do material, resultando em valores de módulos mais elevados nas misturas com altas quantidades de material fresado.

As misturas apresentaram um crescimento do MR proporcional ao aumento de material fresado e inversamente proporcional ao teor de óleo vegetal residual, o que pode ser melhor visualizado nas curvas de nível da Figura 43.

Figura 43 - Curvas de nível das variáveis Teor de óleo vegetal residual (%) e material fresado (%) para MR (NBR 16018)



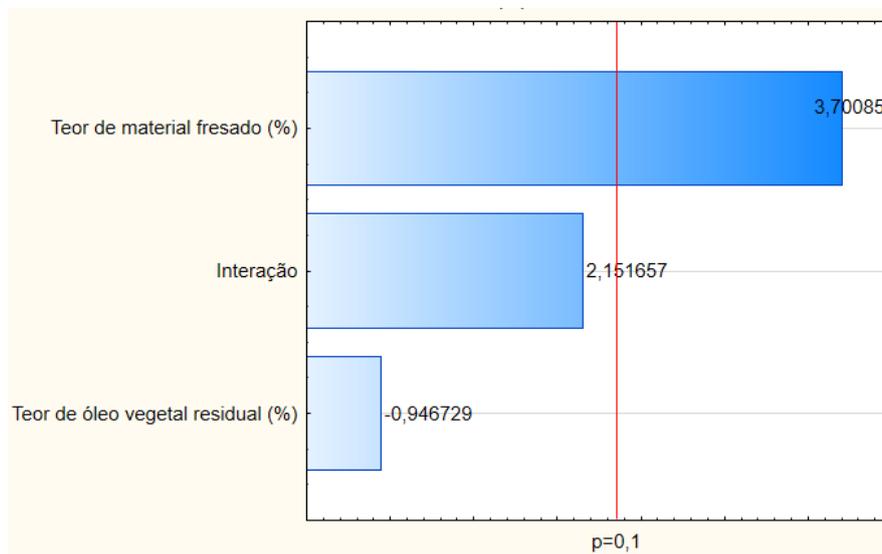
Vale ressaltar que análise do Módulo de Resiliência não pode ser feita de maneira isolada, visto que está diretamente relacionada com a rigidez da mistura. Valores maiores ou menores podem ser aceitos dependendo da estrutura do pavimento, e deve ser considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o formam, sobretudo a camada de base (LUZ *et al.*, 2019). Por isso, é um equívoco afirmar que quanto maior o valor do Módulo de Resiliência melhor o desempenho da mistura asfáltica. As misturas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático, flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e boa resistência à tração para evitar rupturas prematuras (GAMA, 2013).

4.4.3 Lottman modificado

Os resultados da perda da resistência por umidade são analisados por meio da relação entre as resistências à tração de corpos de prova condicionados e corpos de provas não submetidos ao condicionamento. Essa relação, em porcentagem, é denominada de Resistência Retida à Tração (RRT). Com relação a esse parâmetro, a variável que se mostrou significativa foi a quantidade de material fresado ao nível de 90% de significância, o que pode ser visto no Diagrama de Pareto (Figura 44). Portanto, o teor de material fresado tem uma maior

influência nos resultados do dano por umidade induzida do que a quantidade de óleo vegetal residual.

Figura 44 - Diagrama de Pareto para Lottman Modificado



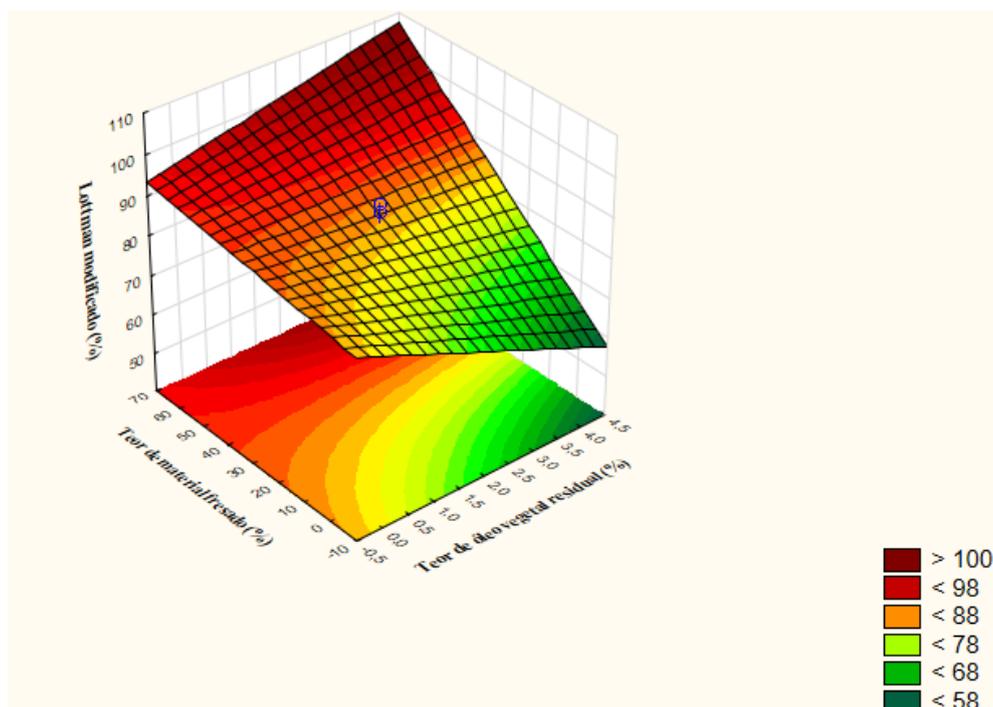
Por meio da ANOVA (Tabela 24) é observado o nível de significância de 10% para o teor de material fresado, 86,5% das variáveis podem ser explicadas pelo modelo, e que apenas a variável de teor de material fresado alcança o nível de confiança do modelo.

Tabela 24 - ANOVA Lottman Modificado

ANOVA - R ² 0,8650				
Fator	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	F	Valor de P
Teor de óleo vegetal residual (%)	30,25	1	0,89630	0,413621
Teor de material fresado (%)	462,25	1	13,6963	0,034258
Interação	156,25	1	4,62963	0,120519
Erro	101,25	3		
Total	750,00	6		

Na Figura 45 é apresentada a superfície de resposta para o ensaio de Lottman Modificado onde é possível observar que os maiores valores são aqueles que indicam a maior quantidade de material fresado. De acordo com a AASTHO T283/2002 a RRT mínima deve ser de 80%, logo seguindo essa normativa as misturas que possuem 30% de material fresado ou mais atendem a esse valor mínimo. Já a especificação do DNIT 031/2006 preconiza que este valor deve ser superior a 70%, assim apenas as misturas com teor de óleo vegetal residual acima de 1,5% e baixa quantidade de material fresado não atendem as especificações.

Figura 45 - Superfície de Reposta para Lottman



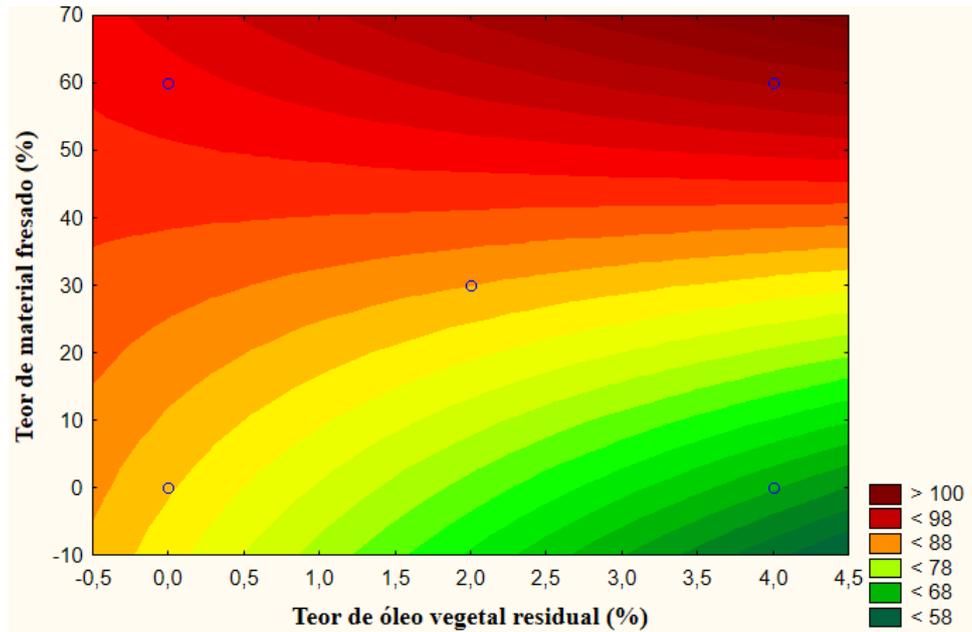
Em relação apenas ao teor de óleo vegetal residual é possível observar uma redução da percentagem de RRT à medida que se eleva a quantidade desse aditivo. Segundo Luz *et al.* (2019) isso pode acontecer devido a quebra das cadeias de hidrocarbonetos insaturados quando os corpos de prova são submetidos ao procedimento de condicionamento.

Para Gama (2016) a redução da resistência à tração após o processo de condicionamento é dado como um parâmetro para identificar a susceptibilidade da mistura ao deslocamento da película asfáltica do agregado (perda de adesividade), considerando o efeito deletério da água. Assim, para Luz *et al.* (2019) a redução vista desse parâmetro é esperada devido à diminuição das temperaturas de compactação, pois diminui a evaporação da água contida nos agregados, aumentando a presença de água na interface ligante/agregado e consequentemente a adesividade ligante/agregado.

Ao analisar a adição de material fresado na mistura é possível verificar um ganho significativo da RRT quando comparada a mistura sem a adição desse material. Suzuki (2019) observou comportamento semelhante para as amostras com RAP onde o requisito de resistência à tração RT por compressão diametral com o efeito do dano por umidade induzida foi atendido para todos os teores de material fresado estudados.

Nas curvas de nível da Figura 46 é possível visualizar as regiões em que foram verificados os baixos índices de RRT.

Figura 46 - Curvas de Nível para Lottman Modificado

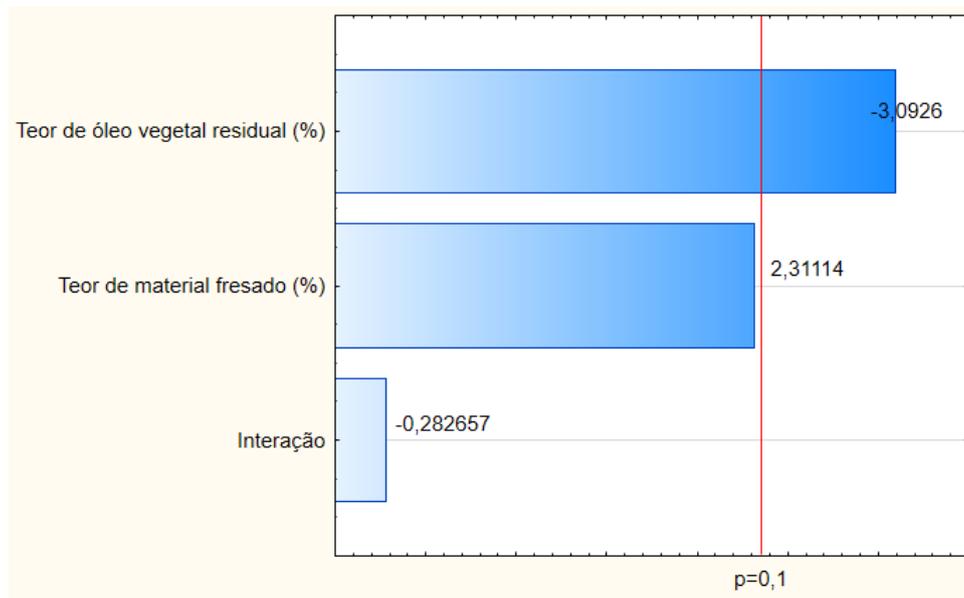


Observando as curvas de nível fica mais evidente que ao aumentar a quantidade de material fresado também aumenta a percentagem do RRT, onde as melhores performances são aquelas com alto teor desse material. No entanto, é possível analisar que esse aumento é visto em conjunto com a adição de maiores quantidades de óleo vegetal residual. Deixando em evidência que apesar da interação dos dois parâmetros não se mostrar significativa para o modelo, como foi visto no Diagrama de Pareto, ela é mais significativa do que apenas a adição de óleo vegetal residual.

4.4.4 Flow Number

Com relação ao Flow Number, o teor de óleo vegetal residual apresentou o nível de 90% de significância, o que pode ser observado no Diagrama de Pareto (Figura 47), ou seja, a quantidade de óleo vegetal residual tem uma influência maior nos resultados desse parâmetro do que a quantidade de material fresado. No entanto, merece destaque que o teor de material fresado chegou muito próximo do nível de 90% de significância.

Figura 47 - Diagrama de Pareto para o Flow Number



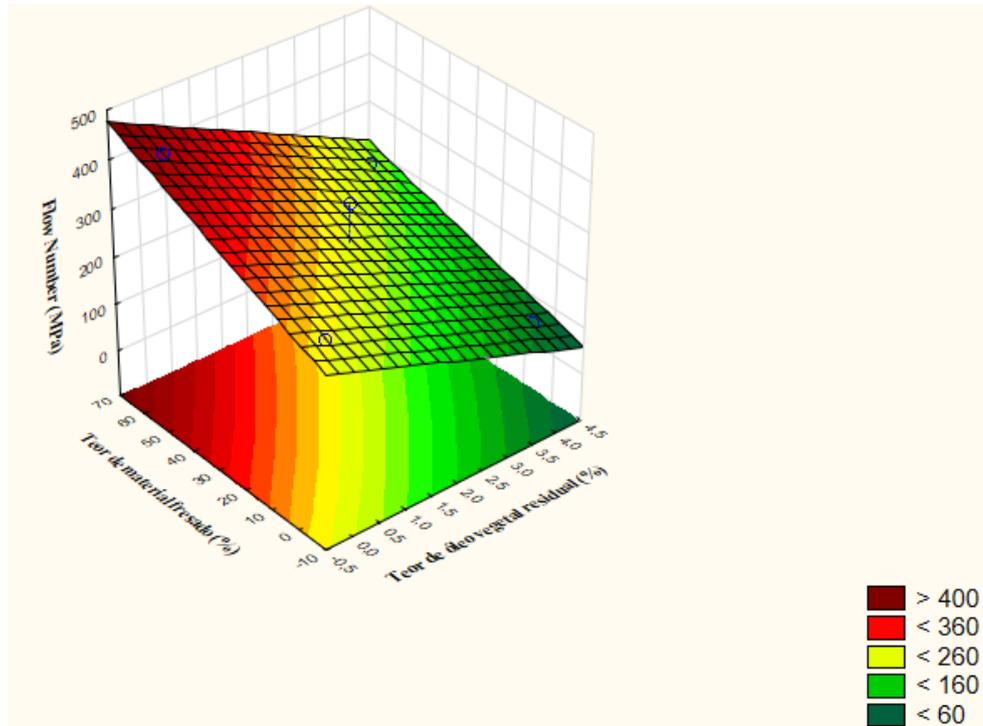
Por meio da ANOVA (Tabela 25) é possível observar ao nível de significância de 10% para o teor de óleo vegetal residual, que 83% das variáveis podem ser explicadas pelo modelo, e somente a variável da quantidade de óleo alcançou o nível de confiança do modelo. Porém é possível observar que o teor de material fresado, apesar de não atingir o nível de significância do modelo, alcançou valores muito próximos.

Tabela 25 - Valores da ANOVA para o Flow Number

ANOVA - R ² 0,8332				
Fator	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	F	Valor de P
Teor de óleo vegetal residual (%)	34596,00	1	9,564203	0,053604
Teor de material fresado (%)	19321,00	1	5,341368	0,103923
Interação	289,00	1	0,079895	0,795820
Erro	10851,71	3		
Total	65057,71	6		

A superfície resposta encontrada para a variável Flow Number, alterando a quantidade de óleo vegetal residual e material fresado é mostrada na Figura 48.

Figura 48 - Superfície de resposta para Flow Number



O teor de óleo vegetal residual, de acordo com o que é mostrado no Diagrama de Pareto, possui influência no valor de Flow Number, pois diminui expressivamente com sua adição. Segundo as pesquisas de Cavalcante (2016), Moraes (2018), Carvalho (2018) e Guerra (2019), a redução desse parâmetro já é esperada, visto que suas pesquisas com adição de óleo de moringa, linhaça, girassol e canola, respectivamente, apresentaram valores de FN inferiores aos das misturas utilizando apenas o CAP 50/70. Indicando assim que as misturas com adição de aditivos redutores de temperaturas têm um maior potencial de sofrer deformação permanente.

De acordo com os parâmetros de referência sugeridos por Nascimento (2008), apresentados na Tabela 26, para análise da susceptibilidade à deformação permanente das misturas asfálticas, é possível observar que apenas valores com uma considerável quantidade de material fresado possuem valores superiores a 300, sendo classificados como tráfego médio. As misturas com alto teor de óleo vegetal residual possuem valores que se classificam em tráfego leve e nenhuma das misturas estudadas podem ser inseridas no padrão de tráfego pesado.

Tabela 26 - Valores mínimos de Flow Number para diferentes níveis de tráfegos

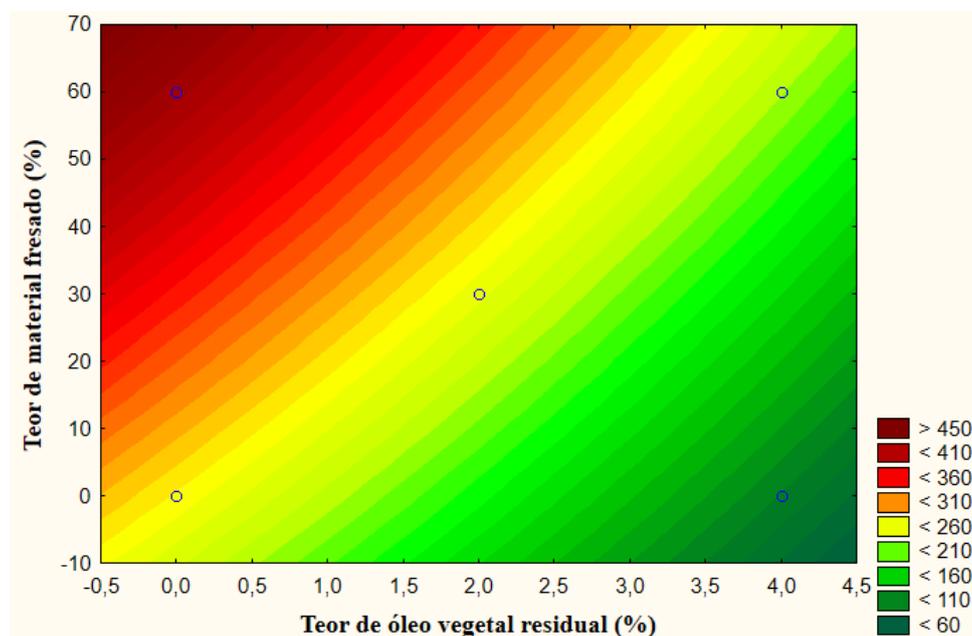
Pesquisas	Leve < 3 x 10 ⁶	Médio < 3x 10 ⁶ ; 1 x 10 ⁷	Pesado 1 x 10 ⁷ ; 3 x 10 ⁷	Extremamente pesado > 3 x 10 ⁷
Nascimento (2008)	-	300	700	-

Verificando o teor de material fresado foi visto que quantidades maiores de fresado mostram resultados superiores, segundo Suzuki (2019) é possível verificar uma diferença de comportamento das misturas com baixos e altos teores de material fresado. As misturas com altos teores apresentaram um maior número de ciclos, indicando uma melhor resistência à deformação permanente, em comparação com as demais misturas.

Bohn *et al.* (2020) realizaram esse ensaio para misturas asfálticas recicladas mornas, com ligante convencional e modificado por polímero, verificaram que as misturas se comportam de maneira similar, independente da temperatura de mistura e compactação. Em relação ao teor de fresado os autores averiguaram que a adição desse material provocou um ganho importante na resistência à deformação permanente. Também observaram a possibilidade de diminuir o gasto no uso de ligante modificado em novas misturas, apenas usando uma mistura com ligante convencional e 50% de material fresado.

A Figura 49 mostra as curvas de níveis para as variáveis de teor de óleo vegetal residual e material fresado.

Figura 49 - Curvas de nível para Flow Number

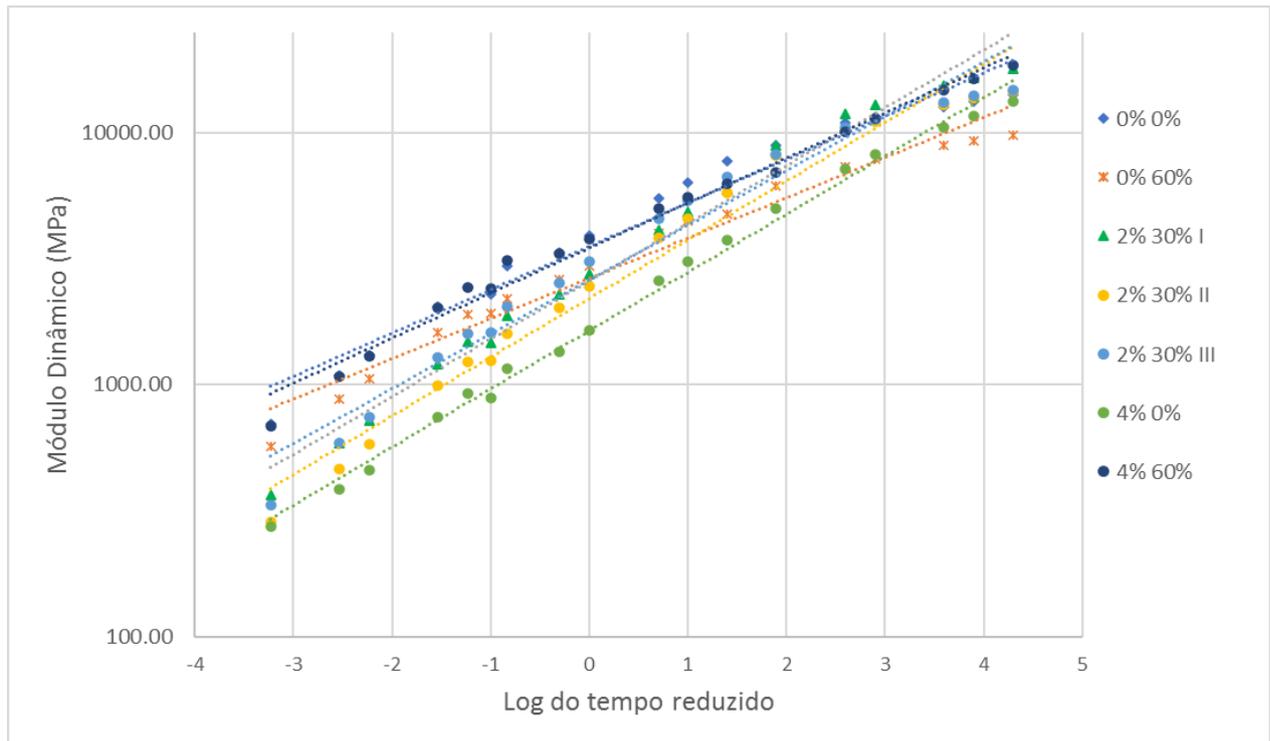


Observando as curvas de nível, evidencia-se que os maiores valores para esse parâmetro são aqueles com alto teor de material fresado e baixa quantidade de óleo vegetal residual. A mistura sem adição de aditivos mostrou resultado superior do que aquelas com apenas óleo vegetal e resultado inferior em comparação as misturas com a adição de material fresado.

4.4.5 Módulo Dinâmico

Por meio das curvas mestras obtidas no ensaio de Módulo Dinâmico, foi possível analisar a caracterização geral da rigidez da mistura asfáltica em relação à frequência de aplicação de carga e temperatura de ensaio. As curvas foram produzidas por meio do procedimento de superposição tempo-temperatura, sendo a temperatura de referência 21°C. As curvas mestras das misturas analisadas foram reunidas e apresentadas na Figura 50.

Figura 50 - Curvas mestras das amostradas estudadas



Por meio dos resultados é possível verificar que a mistura asfáltica com a adição de apenas óleo vegetal residual possui uma maior sensibilidade para as baixas temperaturas, pois apresenta menores valores. Ao acrescentar o material fresado, as misturas asfálticas aumentam de rigidez, sendo o acréscimo de rigidez com a presença do RAP podendo estar relacionado ao aumento da viscosidade do ligante oxidado (SUZUKI, 2019).

Uma maior rigidez das misturas asfálticas pode ser favorável para resistir às deformações permanentes em altas temperaturas (ou pequenas taxas de carregamento) enquanto que uma menor rigidez pode ser mais favorável em temperaturas intermediárias para resistir à fadiga, ou em temperaturas baixas, para resistir ao trincamento térmico (ALI *et al.*, 2016).

4.5 Tabelas com resumo dos resultados

Os resultados dos ensaios mecânicos podem ser observados na Tabela 21, onde foi apresentado na matriz de ensaios do planejamento fatorial. A seguir, observa-se na Tabela 27 e Tabela 28, o resultado dos ensaios e parâmetros reológicos empíricos e fundamentais para o CAP 50/70 puro e modificado com o óleo vegetal residual nos teores de 1 a 4%.

Tabela 27- Resultado dos ensaios e parâmetros reológicos empíricos com o CAP 50/70 puro e modificado com o óleo vegetal residual

Ensaio (ou parâmetro)	Valor especificado/Norma	CAP Puro		CAP + 1% óleo		CAP + 2% óleo		CAP + 3% óleo		CAP + 4% óleo	
		Valor	Atende ou não	Valor	Atende ou não	Valor	Atende ou não	Valor	Atende ou não	Valor	Atende ou não
Penetração (mm)	50 – 70/ DNIT-ME 155/2010	53	√	64	-	84	-	88	-	122	-
Penetração retida (%)	55% (mín)/ DNIT-ME 095/2006	56,6	√	54,7	√	56,0	√	56,8	√	58,2	√
Ponto de amolecimento (°C)	46°C (mín)/ ANP n°19/2005	54,0	√	54,0	√	51,0	√	50,5	√	47,3	√
Varição do PA (°C)	Menor que 8°C/ DNIT-ME 95/2006	6°C	√	3,8°C	√	6,8°C	√	4,8°C	√	6°C	√
IST	-1,5 < IST < 0,7	-0,10	√	0,38	√	0,42	√	0,43	√	0,61	√
Varição de massa	Menor que 0,5%/ DNIT-ME 095/2006	0,0624	√	0,0341	√	0,0481	√	0,0558	√	0,0551	√

Tabela 28 - Comparação dos ensaios e parâmetros reológicos fundamentais com o CAP 50/70 puro e modificado com o óleo vegetal residual

Ensaio (ou parâmetro)	Valor especificado/Norma	CAP Puro		CAP + 1% óleo		CAP + 2% óleo		CAP + 3% óleo		CAP + 4% óleo	
		Valor	Atende ou não								
Viscosidade rotacional a 135°C (cP)	274 (mín) - NBR 15187/2007	487,5	√	456,3	√	432,5	√	392,5	√	306,25	√
Viscosidade rotacional a 150°C (cP)	112 (mín) - NBR 15187/2007	248,2	√	234	√	224	√	205	√	164	√
Viscosidade rotacional a 177°C (cP)	57/285 - NBR 15187/2007	92,75	√	89,25	√	85	√	80,25	√	66,5	√
PG (°C)	-	64	-	64	-	64	-	64	-	58/	-
MSCR_Jnr _{0,1} (1/kPa)	-	1,55	-	1,98	-	2,07	-	1,61	-	2,14	-
MSCR_Jnr _{3,2} (1/kPa)	-	2,58	-	2,77	-	3,13	-	2,07	-	3,25	-
MSCR_R% em 0,1 KPa (%)	-	30,90	-	15,63	-	16,56	-	13,92	-	15,47	-
MSCR_R% em 3,2 Kpa (%)	-	3,10	-	3,65	-	3,04	-	4,47	-	2,67	-
Dif. Percentual (Jnr) (%)	75% - AASHTO MP19	70	√	39,84	√	51,66	√	28,28	√	51,46	√
LAS_Parâmetro "A"	-	1,89 x 10 ⁸	-	2,19 x 10 ⁷	-	3,47 x 10 ⁷	-	1,92 x 10 ⁷	-	0,77 x 10 ⁷	-
LAS_Parâmetro "B"	-	4,194	-	4,472	-	4,493	-	4,561	-	3,791	-
LAS_Nf em 2,5%	-	405680	-	364413	-	566335	-	295141	-	238977	-
LAS_Nf em 5%	-	22164	-	16422	-	25148	-	12503	-	17262	-
LAS_Nf em 10%	-	1211	-	740	-	1117	-	530	-	1247	-

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O objetivo principal desta pesquisa foi estudar o comportamento de misturas asfálticas com adição de material fresado e óleo vegetal residual. Com isso foi observado que, a quantidade de RAP e de óleo vegetal residual adicionados, influenciou nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Em relação às propriedades físicas do ligante asfáltico modificado com óleo vegetal residual foi possível perceber um aumento da penetração, redução do ponto de amolecimento e da viscosidade promovendo uma melhoria na trabalhabilidade da mistura asfáltica, pois, os óleos agem na interface agregado-ligante, permitindo o correto cobrimento do agregado pelo filme de ligante e promovendo uma melhor lubrificação da misturas. Embora não seja o foco deste trabalho, vale mencionar que esta redução de viscosidade contribuiu para uma redução nas temperaturas de usinagem e compactação das misturas.

A reologia dos ligantes modificados mostrou que a incorporação do óleo vegetal residual alcançou temperaturas de falha no grau de desempenho iguais, antes e após o processo de envelhecimento à curto prazo indicando que o aditivo pode funcionar como antioxidante. Também foi possível verificar performances inferiores quanto à deformação permanente e à vida de fadiga em relação ao ligante puro, como se era esperado devido a redução da viscosidade do ligante asfáltico proporcionada pela adição do óleo.

Em relação à análise das propriedades mecânicas o planejamento fatorial foi determinante no que se refere ao cálculo do número de ensaios e na combinação entre o teor de óleo vegetal residual e teor de material fresado. As superfícies de resposta apresentaram um indicativo do comportamento das variáveis analisadas, principalmente o ensaio de resistência à tração, onde apresentou um modelo significativo e preditivo.

Também foi observado que na maioria dos ensaios, a variável que se mostrou mais influente nos resultados foi o teor de óleo vegetal residual, com exceção do ensaio de Lottman modificado onde o material fresado foi mais significativa nos resultados. A reutilização desse óleo também traz benefícios ambientais, tendo em vista os malefícios e problemas que o descarte incorreto pode provocar ao meio ambiente.

Além disso, observando que para as misturas com 60% de material fresado (MF60), não se teve adição de brita 19,0 mm e uma redução de aproximadamente 80% da quantidade de brita 12,5 mm utilizada na mistura sem material fresado (MF0), além de uma redução de 1,2% de ligante asfáltico novo, são fortes indicativos de uma provável economia na fabricação destas misturas asfálticas recicladas com alto teor de material fresado. De maneira geral, foi

possível concluir que adicionar material fresado às misturas asfálticas é viável e promissora do ponto de vista técnico e ambiental e juntamente com o incremento do óleo vegetal residual ocorre a melhoria na trabalhabilidade das misturas.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

- Analisar o efeito do óleo vegetal residual como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas contendo percentuais de material fresado mais elevado;
- Avaliar o grau de ativação do ligante do material fresado e a interação do ligante envelhecido com o novo das misturas recicladas.
- Verificar a viabilidade de execução de um trecho experimental utilizando a tecnologia das misturas asfálticas modificadas com material fresado e óleo vegetal residual.
- Realizar um estudo econômico e ambiental como complemento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-QADI, I. L.; AURANGZEB, Q.; CARPENTER, S. H.; PINE, W. L.; TRAPANIER, J. **Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures**. Research Report FHWA-A-ICT-12-002, Illinois Center for Transportation, Rantoul, 2012.

AL-QADI, I.L., ELSEIFI, M., CARPENTER, S.H. **Reclaimed Asphalt Pavement – A literature review**. Project Report FHWA-ICT-07-001. Illinois Center for Transportation. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, 2007.

ALI, A. W.; MEHTA, Y. A.; NOLAN, A.; PURDY, C.; BENNERT, T. Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators. **Construction and Building Materials**. v. 110, p.212-217. 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Superpave Volumetric Mix Design**. AASHTO M 323-13, Washington, D. C., 2013.

_____. **AASHTO TP 101**: Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. Washington, DC. 2012.

_____. **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 M 320**: Standard specification for performance-graded Asphalt Binder. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2010.

_____. **ASTM 28721**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 2004.

_____. **ASTM D6373-16**: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. West Conshohocken, PA, 2016.

_____. **ASTM D7405-15**: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, PA, 2015.

ANP N° 19. **Regulamento Técnico para Realização dos Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento e Elaboração do Relatório Demonstrativo**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2005.

ANTONY, J. Design of experiments for engineers and scientists. **Oxford: Butterworth-Heinemann**, 2003.

ASLI, H.; AHMADINIA, E.; ZARGAR, M.; KARIM, M.R. Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder. **Construction and Building Materials**. v. 37, p. 398-405, 2012.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. MS-4. 7th. Asphalt Institute, 2007.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. Department of Transportation. FHWA-SA-98-042. Washington, D.C., 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2004.

_____. **NBR 16018** – Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. São Paulo. 2011.

AZAHAR, W.; JAYA, R.; HAININ, M.; BUJANG, M.; NGADI, N. Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder. **Construction and Building Materials**. v. 126, p. 218–226, 2016.

BARROS, A. G. **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2020.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: EDUNICAMP, 2007.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L.; CERATTI, J.; SOARES, J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008.

BOHN, K. A. **Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2017.

BOHN, K. A.; SPECHT, L. P.; BRONDANI, CH.; CORREA, B. M.; PINHEIRO, G. S.; ELDT, K. G.; BARBOZA JUNIOR, V. S.; BOEIRA, F. D.; PEREIRA, D. S. Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero. **Revista Transportes**. v. 28, n. 1. 2020.

BONFIM, V.; DOMINGUES, F. A. A. **Utilização de Fresagem e Reciclagem “In Situ” a Frio. Alternativas na Recuperação de Pavimentos Asfálticos**. 29º Reunião Anual de Pavimentação. v. 3, p. 602-621. Cuiabá - MT. 1995.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3ª ed. São Paulo: Exceção Editorial. 2011.

BRANCO, I. G.; GASPARETTO, C. A. Aplicação da metodologia de superfície de resposta para o estudo da temperatura sobre o comportamento reológico de misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v. 23, p. 166-171. Campinas. 2003.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de misturas asfálticas: evolução após 10 anos e a situação atual na França.** 3º Salão de Inovação ABCR - 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Foz do Iguaçu. 2011.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

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

CAVALCANTE, Fabiano Pereira. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

CAVALLI, M. C.; ZAUMANIS, M.; MAZZA, E.; PARTL, M. N.; POULIKAKOS, L. D. Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators. **Composites Part B.** v. 141, p. 174-181. 2018.

CORRÊA, L. P.; GUIMARÃES, V. N.; HESPANHOL, L. I.; SILVA, J. V. **Impacto ambiental causado pelo descarte de óleo: estudo do destino que é dado para o óleo de cozinha usado pelos moradores de um condomínio residencial em Campos dos Goytacazes – RJ.** Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento. V.7, p. 341-352. 2018.

D'ANGELO, J.; ROBERT, K.; RAJ N, S.; LUDO, Z. Revision of the Superpave high-temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,** v. 76, p. 123-162, 2007.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília – DF. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE COMBUSTÍVEIS - DNC – **Regulamento Técnico DNC 04.** Portaria 44/97 – Especificações dos aditivos asfálticos para misturas à quente, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT – ME 054/97** – Equivalente Areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNIT – ME 035/98** - Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNIT-ME 081/98** - Agregados - Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

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

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

_____. **DNIT ES 033/2005**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

_____. **DNIT ES 034/2005**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de serviço. DNIT– ES 034/2005. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **DNIT – EM 095/2006**. Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de material, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT – ME 131/2010** - Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT - ME 136/10** – Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT – ME 155/2010** - Material asfáltico - determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT – ME 180/2018** – Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro. 2018.

_____. **DNIT – ME 184/2018** – Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. Rio de Janeiro, 2018.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; SC, D. Susceptibility of Asphalt Binders to Rutting: Literature Review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 2, p. 1–8, 2015.

DON BROCK J.; RICHMOND J. L. **Milling and recycling**. Technical Paper T-127. ASTEC. INC. Chatanooga. 2007.

DOYLE, J. D.; HOWARD, I. L. Rutting and moisture damage resistance of high reclaimed asphalt pavement warm mixed asphalt: loaded wheel tracking vs. Conventional methods. **Road Materials and Pavement Design**. v. 14, n. 2, p. 148-172. 2013.

FAROOQ, M. A.; MIR, M. S.; SHARMA, A. Laboratory study on use of RAP in WMA Pavements using rejuvenator. **Construction and Building Materials**. v. 168, p. 61-72. 2018.

FWA, T. F. **Evaluation of Engineering Benefits of RJSeal Report prepared for Kalvani International Pte Ltd**. Department of Civil Engineering. National University of Singapore. 2006.

GAMA, D. A. **Avaliação do potencial do uso do etileno acetato de vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2013.

GAMA, D. A. **Efeito da Adição de Polímeros Reativo, Não-Reativo e Ácido Polifosfórico e Suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2016.

GASPAR, M.; PINHEIRO, G. S.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L. **Caracterização do material fresado e quantificação da ativação do ligante para produção de misturas asfálticas recicladas.** In: XX CILA Congresso Ibero Latinoamericano de Asfalto. México 2019.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado.** Tese (Doutorado em Engenharia – Departamento de Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2015.

GUERRA, T. D. **Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2019.

HAGHSHENAS, H. F., NABIZADEH, H., KIM, Y-R., SANTOSH, K. **Research on High-RAP Asphalt Mixtures with Rejuvenators and WMA Additives.** University of Nebraska-Lincoln, Report N° SPR-P1(15) M016. p. 66 Lincoln. 2016.

HANSEN, K. R. & COPELAND, A. **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2016.** Information Series 138. NAPA. Lanham, 2017.

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

INSTITUTO DE INFRA-ESTRUTURAS RODOVIÁRIAS - INIR. **Disposições Normativas: Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos.** Lisboa. Portugal. 2015.

JI, J.; YAO, H.; SHUO, Z.; YOU, Z.; LI, H.; XU, S.; SUN, L. Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders. **Journal of Materials in Civil Engineering.** v. 29, n.3. 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.

LEI, Z.; BAHIA, H.; YI-QIU, T. Effect of bio-based and refined waste oil modifiers on low temperature performance of asphalt binders. **Construction and Building Materials**. EUA, n. 86 p. 95-100, 2015.

LIMA, A. T. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE. 2013.

LUCENA, L. C. F. L.; SILVEIRA, I. V.; COSTA, D. B. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera para uso em misturas mornas. **Revista Matéria**. v. 21, n. 01, p. 72-82. Brasil. 2018.

LUZ, P. M. S. G. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras Pinus e Eucalipto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2019.

LUZ, P. M. S. G.; MARTINS, S. F.; COSTA, D. B.; LUCENA, C. F. L. Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais. **Revista Transportes**. v. 27, n.1. 2019.

MAH, Victor. **Concept of P4 – Perpetual Pavement Presentation Process**. PRIPavement Rejuvenation International. 2016.

MAZZONI, G.; BOCCI, E.; CANESTRARI, F. Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. v. 5, n. 3, p. 157-168. 2018.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro. 2012.

MORAES, T. M. R. P. **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. 2011. 229p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo - SP. 2011.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem de misturas asfálticas densas com uso de compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2008.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION - NAPA. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2013-2016**. 2017.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION - NAPA. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2016-2017**. 2018.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY - NCAT. Disponível em: <<http://www.ncat.us/info-pubs/technical-reports.html>>. Acesso em 16 de mar. 2020

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - NCHRP. **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual**. Report 452. Transportation Research Board – National Research Council. National Academy Press. Washington - D. C. 2001.

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

OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; ABREU, L. P. F.; PEREIRA, P. A. A. Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. v. 53, n. 3, p. 266–275. 2012.

OLIVEIRA, R. B.; RUIZ, R. B.; GABRIEL, M. L. D. S.; STRUFFALDI, A. Sustentabilidade ambiental e logística reversa: análise das redes de reciclagem de óleo de cozinha na região metropolitana de São Paulo. **Revista ADM.MADE**, v.18, n.2, p. 115-132. 2014.

OLIVEIRA, R. B. **Estudo sobre o efeito do ccbitt-113ad no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão-SE. 2014.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à Espectroscopia**. Cengage Learning, 2010.

PILATI, F. **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2008.

PORTUGAL, A. C. X.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, A. E. F. L.; COSTA, D. B. Rheological performance of soybean in asphalt binder modification. **Road Materials and Pavement Design**. v. 19, n. 4, p. 768-782. 2017.

PRADYUMNA, T. A.; MITTAL, A.; JAIN, P. K. **Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction**. 2° Conference of Transportation Research Group of India – Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2013.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. **Warm-mix asphalt: Best Practices**. Quality Improvement Publication 125, 3ª ed. Lanham: NAPA. 2012.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2a ed. Campinas, SP. 2009. 618p.

SABOURI, M.; BENNERT, T.; DANIEL, J. S. & KIM, Y-R. A comprehensive evaluation of the fatigue behavior of plant-produced RAP mixtures. **Road Materials and Pavement Design**. p. 1-26. 2015.

SEGUNDO, I. G. R.; BRANCO, V. T. F.C.; VASCONCELOS, K. L.; HOLANDA, A. S. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. **Revista Transportes**. v. 24, n. 4, p. 86-84. 2016.

SINGH, D.; ASHISH, P.K.; KATAWARE, A.; HABAL, A. Evaluating performance of PPA-and-Elvaloy-modified binder containing WMA additives and lime using MSCR and LAS tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 8. 2017.

SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELLO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E.; TIEFENSEE, M. D. **Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo**. In: 42ª RAPv: Reunião Anual de Pavimentação. 2013.

SILVA, A. R. V.; FERREIRA, H. C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. v. 3, n.2, p. 26-35, 2008.

SILVA, G. G. da. **Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2016.

SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M.; JIMÉNEZ, A. M. G. **Avaliação do Efeito Selante de Agente Rejuvenescedor em Misturas Asfálticas**. 20º Encontro de Asfalto, IBP Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. 2017.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos Efeitos de Produtos Rejuvenescedores em misturas asfálticas**. Tese (Doutorado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília – DF. 2014.

SILVA, T. F. **Estudo de Mistura de Solos para Impermeabilização Eficiente de Camada de Base de Aterros Sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2017.

SOBREIRO, F. **Efeito Da Adição De Ácidos Fosfóricos No Comportamento Reológico De Ligantes Asfálticos Puros E Modificados Com Copolímero SBS**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2019.

TEYMOURPOUR, P.; BAHIA, H. **Linear Amplitude Sweep Test: Binder Grading Specification and Field Validation**. Binder Expert Task Group Meeting, 2014.

TOLINI, J. **Estudo de experimentos fatoriais 2k aplicados em um processo industrial.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2012.

TONIAL, I. A. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

TUCHUMANTEL, J. O. **Avaliação Estrutural de Trecho Experimental Urbano de Pavimento Asfáltico Reciclado a Frio.** In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação. Rio De Janeiro, RJ. 2012.

VALDÉS, G.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MIRÓ, R.; MARTÍNEZ, A.; BOTELLA, R. 2011. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials.** v. 25, p. 1289-1297. 2011.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. **Projeto de Misturas de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente com Diferentes Teores de Material Fresado.** In: Anais do XII Congresso Ibero Latinoamericano Del Asfalto – CILA. 2003.

YOUNG, T. **Recycling Hot Mix Asphalt Pavements.** Information Series 123. NAPA, 1996.

ZARGAR, M.; AHMADINIA, E.; ASLI, H.; KARIM, M. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. **Journal of Hazardous Materials.** v. 233, p. 254–258. 2012.

ZUBARAN, M. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.