



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS
ASFÁLTICAS COM CAP 50/70 MODIFICADO POR POLÍMERO
REATIVO/ NÃO-REATIVO E ÁCIDO POLIFOSFÓRICO**

MIRTES AILA RODRIGUES DE CARVALHO

Campina Grande, 2018.

MIRTES AILA RODRIGUES DE CARVALHO

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS
ASFÁLTICAS COM CAP 50/70 MODIFICADO POR POLÍMERO
REATIVO/ NÃO-REATIVO E ÁCIDO POLIFOSFÓRICO**

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

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
Orientador

Prof. Dr. Ana Maria Gonçalves Duarte
Mendonça
Coorientadora

Campina Grande, 2018.

C331e Carvalho, Mirtes Aila Rodrigues de.
Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado por polímero reativo/não-reativo e ácido polifosfórico / Mirtes Aila Rodrigues de Carvalho. – Campina Grande, 2018.
107 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, Profa. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça".

Referências.

1. Ligante de Alto Desempenho. 2. Polímero Reativo. 3. Ligante Asfáltico. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Mendonça, Ana Maria Gonçalves Duarte. III. Título.

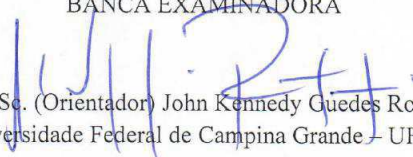
CDU 624.15(043)


MIRTES AILA RODRIGUES DE CARVALHO

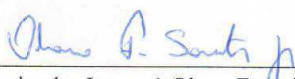
**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS
ASFÁLTICAS COM CAP 50/70 MODIFICADO POR POLÍMERO
REATIVO/ NÃO-REATIVO E ÁCIDO POLIFOSFÓRICO**

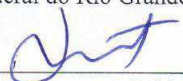
Dissertação aprovada em 12/04/2018 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande.


BANCA EXAMINADORA


Prof. D.Sc. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG


Prof. D.Sc. (Orientador) Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG


Prof. Dsc. (Examinador Interno) Olavo Francisco dos Santos Junior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN


Prof. Dsc. (Examinador Externo) Fabiano Pereira Cavalcante
UNINASAU / Recife - PE


Prof. D.Sc. (Examinador Interno) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

DEDICATÓRIA

À Deus e aos meus pais Morizalton e Ana Maria, que me ensinaram os conhecimentos da integridade e da perseverança, a acreditar nos meus sonhos e com muito amor e esforço me prepararam para a vida. As minhas irmãs Maria Antônia e Mariane e ao meu amor, meu noivo Douglas Brasil, que esteve sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por abençoar a minha vida e por me ajudar a realizar os meus sonhos.

À minha família, que sempre será o meu maior presente e apoio, que me ensinou a ser forte, a ter caráter e incentivou a minha formação intelectual. Aos meus pais, Ana Maria e Morizalton, por toda dedicação e esforço para a conclusão dos meus estudos e das minhas irmãs.

Às minhas irmãs, Maria Antônia e Mariane, presentes em todos os momentos, sempre me apoiando e incentivando.

À Douglas Brasil, por ser meu melhor amigo, companheiro e noivo, por sua contribuição direta e indireta na realização desta pesquisa.

Aos meus orientadores, John Kennedy e Ana Maria, por todo ensino, apoio e contribuição nesta pesquisa e em minha formação. Meus sinceros agradecimentos.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia e Pavimentos (LEP) da UFCG, Daniel, Christian Rafael, Conrado, Jadilson e Joseildo, por toda a ajuda na realização dos ensaios desta pesquisa, obrigada pelo apoio.

À todas as empresas que forneceram os materiais necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.

A Érika Vitória de Negreiros Duarte por realizar os ensaios de ponto de amolecimento, penetração e recuperação elástica nos ligantes asfálticos 55/75 e os modificados nos teores de 1,8S74; 0,3SX mais 0,3 e 0,5 de ácido polifosfórico. Muito obrigada.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela oportunidade e Aprendizado.

A CAPES, pela bolsa de pesquisa, que ajudou em todos esses anos de dedicação ao estudo. Muito obrigada.

À todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

As misturas asfálticas com ligantes modificados por polímeros são cada vez mais utilizadas para satisfazer as necessidades crescentes do tráfego rodoviário, melhorando as condições de resistência, de durabilidade dos revestimentos asfálticos sob a ação de cargas pesadas. Os polímeros reativos/não-reativos e o ácido polifosfórico, em separado, são opções utilizadas como modificadores dos ligantes cujo o objetivo é melhorar as propriedades mecânicas da mistura asfáltica. No entanto, o uso combinado dos modificadores pode proporcionar melhores resultados que o uso individual. O objetivo desta pesquisa foi de avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas quando modificadas por polímero reativo/não-reativo associados ao ácido polifosfórico como catalizador em diferentes teores. Para isso foram realizados ensaios físicos e mecânicos nos ligantes 50/70 com adição de Etileno Acrilato de Metila e Metacrilato de Glicidila (EMA-GMA) comercialmente conhecido por S74, Terpolímero de Alta densidade (SX500) e Ácido Polifosfórico (PPA116%), antes e após envelhecimento a curto prazo (RTFO) e nos ligantes 50/70, 55/75 sem a modificação. Foram dosadas misturas asfálticas com 1,8% S74, 0,3% SX500 associadas a teores variados de 0,15; 0,3 e 0,5% PPA116% e analisado o comportamento mecânico das misturas asfálticas por meio de ensaios de Resistência a Tração, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico, *Flow Number*, *Lotman* Modificado e Desgaste Cântabro. Os resultados indicam que as misturas asfálticas com os ligantes modificados com polímero reativo/não-reativo associados ao ácido polifosfórico nos teores de 0,3 e 0,5% PPA se classificam como ligantes elastoméricos 60/85-E e suas respectivas misturas asfálticas possuem maior resistência a deformação permanente quando submetidos a altas temperaturas, maior resistência ao desgaste e menor susceptibilidade a umidade, indicando que tais misturas podem ser usadas como alternativa a misturas asfálticas convencionais, principalmente para regiões de clima tropical.

Palavras chave: ligante de alto desempenho; polímero reativo; ligante asfáltico.

ABSTRACT

The polymer modified asphalt mixtures are increasingly being used to satisfy the growing road traffic needs, improving their resistance conditions and the asphalt coating durability under the action of heavy loads. The reactive/non-reactive polymers and the polyphosphoric acid, separated, are largely used as modifiers for the asphalt binders whose objective is to improve its mechanical properties. However, the combined use of them can provide better results than individually. This researches objective was to evaluate the mechanical behavior of the asphalt mixtures when modified with reactive/non-reactive polymer associated with the polyphosphoric acid as a catalyst in different contents. There were performed physical and mechanical tests on the 50/70 binder with the addition of ethylene methyl acrylate and glycidyl methacrylate (EMA-GMA) commercially known as S74, high density thermo-polymer (SX500) and polyphosphoric acid (PPA 116%), before and after the short term aging process (RTFO). The same procedures were performed on the 50/70 and 55/75 non modified binders. Asphalt mixtures were designed with 1,8% S74, 0,3 SX500 associated with varied contents of 0,15; 0,30 and 0,50% PPA 116% and analyzed in relation to its mechanical behavior by means of traction resistance, resilience module, dynamic module, flow number, modified lotman and cântabro wear tests. The results indicate that the asphalt mixtures modified with reactive/non-reactive polymer associated with the polyphosphoric acid in the contents of 0,3 and 0,5% PPA are classified as 60/85-E elastomeric binders and have a higher permanent deformation resistance when subjected to high temperatures, greater wear resistance and lower susceptibility to humidity, indicating that this mixtures can be used as an alternative to conventional asphalt mixtures, mainly in tropical climate regions.

Key-words: high performance binders; reactive polymer; asphalt binder.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 Organização do trabalho	20
CAPÍTULO 2	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Revestimento asfáltico	22
2.2 Principais defeitos dos revestimentos asfálticos	23
2.3 Reologia de ligantes asfálticos.....	25
2.4 Polímeros modificadores de ligantes asfálticos	27
2.4.1 Principais polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos.....	29
2.4.2 Uso de Polímeros elastômeros termoplásticos	30
2.4.3 Polímeros não reativos	33
2.4.4 Ácido polifosfórico como modificador de ligantes asfálticos.....	34
2.4.5 Considerações finais da fundamentação teórica.....	38
CAPÍTULO 3	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 Materiais utilizados.....	41
3.1.1 Ligante asfáltico	41
3.1.2 Modificadores do ligante asfáltico	41
3.2 Métodos.....	42
3.2.1 Composição dos ligantes asfálticos com os modificadores.....	42
3.2.2 Determinação do teor de polímero reativo e não reativo.....	42
3.2.3 Determinação do teor de ácido polifosfórico	42
3.2.4 Determinação das composições de mistura	43
3.2.5 Ensaio com os ligantes	44
3.2.5.1 Envelhecimento de ligantes asfálticos	44
3.2.5.2 Envelhecimento de ligantes asfálticos a curto prazo	45
3.2.6 Ensaio de penetração	46

3.2.7	Ponto de amolecimento	46
3.2.8	Recuperação elástica.....	46
3.2.9	Adesividade	47
3.2.10	Viscosidade rotacional.....	48
3.3	Dosagem superior performing asphalt pavements (SUPERPAVE).....	48
3.4	Propriedade físicas e mecânicas dos agregados	49
3.4.1	Caracterização dos agregados.....	49
3.4.2	Granulometria.....	50
3.4.3	Absorção e densidades dos agregados graúdos	51
3.4.4	Densidade do Agregado Miúdo.....	53
3.4.5	Massa específica dos agregados graúdos e miúdos	53
3.4.6	Equivalente a areia.....	54
3.4.7	Abrasão “Los Angeles”	55
3.4.8	Forma das partículas	56
3.4.9	Angularidade dos agregados graúdos e miúdos	57
3.4.10	Adesividade do ligante betuminoso.....	58
3.5	Procedimento de dosagem.....	59
3.5.1	Compactação dos corpos de prova	62
3.5.1.1	Método Rice Test	63
3.5.1.2	Teores estimados para os ligante estudados	66
3.6	Ensaio mecânicos de concreto asfáltico	67
3.6.1	Resistência a tração indireta por compressão diametral	67
3.6.2	Módulo de Resiliência	68
3.6.3	Módulo Dinâmico.....	70
3.6.4	Deformação Permanente.....	72
3.6.5	Dano por Umidade Induzida - Lottman.....	73
3.6.6	Desgaste Cântabro	74
CAPÍTULO 4		76
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1	Ensaio Empíricos com os Ligantes Puro e modificados	76
4.1.1	Ensaio de Penetração.....	76
4.1.2	Ponto de Amolecimento	78
4.1.3	Recuperação elástica	81

4.1.4	Viscosidade Rotacional	82
4.1.5	Variação da massa após envelhecimento a curto prazo (RTFO)	85
4.2	Ensaio mecânicos com ligantes puro e modificados	86
4.2.1	Resistência a Tração.....	86
4.2.2	Lottman Modificado.....	87
4.2.3	Desgaste Cântabro.....	89
4.2.4	Módulo de Resiliência.....	89
4.2.5	Módulo Dinâmico	91
4.2.6	Deformação Permanente (<i>Flow Number</i>)	97
CAPÍTULO 5		100
5	CONCLUSÕES.....	100
6	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	102
REFERÊNCIAS		103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites da resolução nº32 da ANP para ligantes 60/85-E.....	30
Tabela 2 - Graus do ácido fosfórico	35
Tabela 3 - Ligantes e teores de polímeros utilizados na modificação do ligante asfáltico.	43
Tabela 4 - Tempos de mistura dos polímeros Polimul S74, Polimul SX500 e PPA116%	44
Tabela 5 – Normas dos ensaios de caracterização física e mecânico dos ligantes asfálticos	44
Tabela 6 - Ensaios de agregados e especificações.....	49
Tabela 7 - Distribuição granulométrica por peneiramento (% retida).....	50
Tabela 8 - Ensaio de massa específica com agregados graúdos e miúdos	53
Tabela 9 - Ensaio de equivalente a areia dos agregados miúdos.....	54
Tabela 10 - Ensaio de angularidade do agregado miúdo.....	58
Tabela 11 - Proporções dos agregados nas granulometrias	61
Tabela 12 - Gmb corrigidos e critérios	64
Tabela 13 - Critérios da dosagem SUPERPAVE	66
Tabela 14 - Nível de tensão referente a cada temperatura.....	71
Tabela 15 - Ensaios físicos e mecânicos dos ligantes asfálticos	86
Tabela 16 - Ensaio desgaste cântabro.....	89
Tabela 17 - Ensaio de Módulo de Resiliência	90
Tabela 18 - Ensaio <i>Flow number</i> das misturas asfálticas.....	97
Tabela 19 - Valores mínimos de <i>Flow Number</i> para diferentes níveis de tráfego	97
Tabela 20 - Resumo dos Ensaios com os ligantes e misturas.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deformação permanente por afundamento da trilha de roda.....	25
Figura 2 - Representação química do polímero RET	32
Figura 3 - Reação do asfalteno com o polímero do tipo RET	32
Figura 4 - Fluxograma de ensaios.....	40
Figura 5 - Equipamento do RTFO (LEP/UFCG)	45
Figura 6 - Ensaio de recuperação elástica	47
Figura 7 - Ensaio de recuperação elástica	47
Figura 8 - Viscosímetro rotacional Brookfield (LEP/UFCG)	48
Figura 9 - Curva granulométrica dos agregados.....	51
Figura 10 - Ensaio para determinação da forma das partículas.....	57
Figura 11 - Etapa da avaliação visual do ensaio de adesividade.....	59
Figura 12 - Fluxograma do processo de dosagem SUPERPAVE.....	60
Figura 13 - Curva granulométrica superior	61
Figura 14 - Curva granulométrica intermediária	61
Figura 15 - Curva granulométrica inferior	62
Figura 16 - Equipamento para ensaio de determinação do Gmm (Rice Test – LEP/UFCG).....	63
Figura 17 - Prensa do ensaio de resistência a tração	67
Figura 18 - Ensaio módulo de resiliência	69
Figura 19 - Ensaio de módulo dinâmico.....	71
Figura 20 - Explicação do cálculo do módulo dinâmico.....	72
Figura 21 – Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN.	73
Figura 22 - Ensaio de penetração à 25°C antes e após RTFO.....	76
Figura 23 - Porcentagem da penetração retida (PPR).....	78
Figura 24 - Ponto de amolecimento (PA) antes e após envelhecimento em RTFO, em °C.....	79
Figura 25 - Variação do Ponto de Amolecimento	80
Figura 26 - Recuperação elástica dos ligantes puro e modificados.....	81
Figura 27 - Viscosidade dos ligantes nas três temperaturas ensaiadas.....	83
Figura 28 - Temperaturas de usinagem e compactação.....	84
Figura 29 - Perda de massa dos ligantes convencional e Modificados	85

Figura 30 - Ensaio de resistência a tração.....	87
Figura 31 - Resistência retida à tração.....	88
Figura 32 - Módulo de resiliência.....	90
Figura 33 - Porcentagem de recuperação retardada a 10% RT	91
Figura 34 - Resultado de módulo dinâmico em função da frequência de aplicação de carga.....	92
Figura 35 - Módulo dinâmico das misturas à 4°C.....	93
Figura 36 - Módulo dinâmico das misturas à 21°C.....	93
Figura 37 - Módulo dinâmico das misturas à 37°C.....	94
Figura 38 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=4°C).....	95
Figura 39 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=21°C).....	95
Figura 40 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=37,7°C)....	96

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
ASTM	American Society for Testing Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Corpo de Prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EDX	Energy Dispersive X-ray
EPI's	Equipamentos de Proteção Individual
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
GI	Massa Específica do Ligante
Gmm	Massa Específica Máxima Medida da Mistura
GMA	Metacrilato de Glicidila
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
HMA	Hot Mix Asphalt
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
LEA	Low Energy Asphalt
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDTs	Linear Variable Differential Transducer
Mag	Massa de agregado
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
N	Número
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NM	Norma Mercosul
Pag	Percentual de Agregado na Mistura
PB	Paraíba
Pl	Teor de Ligante
Pli	Teor de Ligante Inicial

RBV	Relação Betume x Vazios
RRT	Relação de Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin-Film Oven
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
TCU	Temperatura de Compactação e Usinagem
TNM	Tamanho Nominal Máximo
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VAM	Vazios do Agregado Mineral
V _{la}	Volume de Ligante Absorvido
V _{le}	Volume de Ligante Efetivo
V _v	Volume de vazios

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos flexíveis são estruturas de múltiplas camadas onde o revestimento é a camada destinada a receber e transmitir as cargas provenientes do tráfego de veículos de forma atenuada as camadas subjacentes do pavimento. Com o aumento do volume de tráfego, do excesso de carga transportada por eixo, pouco planejamento e intervenções/conservações, aliados as condições ambientais como as altas temperaturas de serviço, fazem com que a vida útil do revestimento asfáltico diminua (SOBREIRO, 2014). Uma das formas para tentar diminuir e/ou solucionar os efeitos desses fatores é a busca por novos materiais que melhorem a durabilidade e o comportamento dos componentes da mistura asfáltica (ligante asfáltico e materiais pétreos) que compõem o revestimento asfáltico.

Nessa perspectiva, no que diz respeito ao ligante asfáltico, muitos estudos são realizados, principalmente com a adição de modificadores, avaliando o seu comportamento quando modificado comparativamente com os ligantes asfálticos não modificados. Os ligantes asfálticos modificados com polímeros tem sido muito utilizado pela indústria de pavimentos, como uma forma de otimizar as propriedades do ligante quanto aos principais defeitos que podem vir a surgir nos revestimentos asfálticos como a deformação permanente (GAMA, 2016). A seleção do tipo de polímero ou copolímero, reativo ou não, ou qualquer outro modificador a ser utilizado depende dos requisitos de desempenho mecânico que se deseja para a camada de revestimento asfáltico.

O copolímero SBS, pertence à classe dos elastômeros termoplásticos é o polímero mais difundido na indústria de modificadores para a pavimentação asfáltica devido aos ganhos de desempenho mecânico que o mesmo proporciona quando adicionados ao ligante. No entanto, no ano de 2009 o mercado mundial de SBS foi atingido por uma escassez de butadieno, que afetou o fornecimento e o custo deste polímero em todo o mundo (XIÃO *et al.*, 2014). Desde então houve uma preocupação da indústria e da academia pela procura por diferentes alternativas de polímeros para substituir o SBS, sem perder qualidade proporcionada por este ligante na camada de revestimento.

Os polímeros termoplásticos são conhecidos por seu baixo custo quando comparado aos polímeros elastômeros termoplásticos. Nesta categoria de termoplásticos, existem as poliolefinas podendo ser do tipo polietileno (PE) e polipropileno (PP) estas são as mais conhecidas e podem ser utilizadas como modificador de ligante asfáltico de forma individual ou como co-modificador. Apesar dos termoplásticos propiciarem aumento da rigidez, podendo resultar em maior resistência a deformação permanente, o seu uso como modificador individual pode apresentar limitações proporcionando separação de fase entre polímero e ligante quando misturado e estocado dependendo do teor utilizado.

Os polímeros reativos (RET), são do tipo de materiais que ao serem adicionados ao ligante asfáltico ocorrem reações químicas, ao contrário dos polímeros não-reativos, onde a mistura é apenas física. Segundo Jasso *et al.*, (2015) quando misturado o polímero reativo com o ligante asfáltico, há evidência de ocorrência de ligações químicas covalentes entre grupos reativos destes polímeros com o ligante asfáltico. Com isso a separação de fase nesse tipo de mistura dificilmente ocorrerá.

O ácido polifosfórico vem sendo utilizado como modificador desde os anos 70, na intenção de obter ligantes asfálticos com viscosidade mais elevada, sem reduzir a penetração. No entanto, estudos apontam que o uso do ácido polifosfórico não está restrito apenas a modificação do ligante de forma individual, é possível utiliza-lo como catalizador de ligantes modificados por terpolímeros reativos funcionando como acelerador químico entre o terpolímero reativo e o ligante, ou até mesmo ser utilizado em combinado com outros ligantes como poliolefinas ou até mesmo SBS.

As misturas asfálticas com elevado desempenho mecânico e de alta resistências as deformações plásticas e elásticas, podem ser uma excelente alternativa para serem usadas em lugares onde o custo de manutenção do revestimento asfáltico é muito elevado, devido ao alto fluxo de veículos como por exemplo corredores de ônibus, BRT, garrações de praças de pedágios etc.

Portanto, acredita-se que o uso combinado dos polímeros reativo (S74), não reativo (SX500) e o ácido polifosfórico (PPA116%), podem ser usados na modificação do ligante convencional (50/70) e este novo ligante ser uma excelente opção de ligante de elevado desempenho mecânico. Com isso será possível minimizar problemas no revestimento asfáltico, como a deformação permanente comum em regiões com o clima

tropical. Para isso foi estudado o comportamento mecânico dos ligantes e das misturas asfálticas, com o ligante convencional (50/70) modificado com polímero reativo e não reativo associados a diferentes teores de ácido polifosfórico e comparados os seus resultados com o comportamento mecânico dos ligantes e das misturas asfálticas com o ligante convencional (50/70) sem modificação e com o ligante 55/75. Acredita-se ser possível identificar composições que possam atender às especificações com polímeros, vida de serviço do revestimento asfáltico, com economia e segurança para os usuários.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado por Polímero Reativo (Polimul S74), Polímero não-reativo (Polimul SX-500) associados ao Ácido Polifosfórico (PPA).

1.1.2 Objetivos Específicos

- avaliar as propriedades físicas e reológicas de ligantes asfálticos: 55/75-E, convencional 50/70 e modificado por Polímero Reativo (Polimul S74), Polímero não Reativo (Polimul SX-500) e Ácido Polifosfórico;
- verificar se os ligantes modificados se caracterizam como ligante elastômeros da classe 60/85 - E, seguindo as especificações da ANP n° 04/2010;
- verificar o efeito do aumento do teor de ácido polifosfórico no ligante modificado por polímero reativo e não reativo, nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica;
- avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas no que concerne: susceptibilidade a umidade, resistência à tração, resistência a deformação plástica (deformação permanente) e resistência a abrasão;

1.2 Organização do trabalho

Esta dissertação é composta de cinco capítulos e anexos. A seguir uma breve descrição do assunto abordado em cada um deles.

Capítulo 1 - Introdução, Objetivos e Organização do Trabalho.

Capítulo 2 - Compreende a fundamentação teórica, onde são abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 3 - São descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento desta dissertação.

Capítulo 4 - São apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental.

Capítulo 5 - Apresentam-se as conclusões que foram obtidas neste trabalho.

Capítulo 6 - São apresentados sugestões para pesquisas futuras.

No final do trabalho estão inseridas as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão apresentados as referências bibliográficos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. São abordados tópicos sobre a utilização de ligantes asfálticos. Na sequência foi realizada uma análise dos principais defeitos de pavimentos asfálticos e suas relações com o comportamento reológico do ligante. Em seguida, é apresentada uma revisão da literatura sobre o uso de polímeros para modificação de ligantes asfálticos, com ênfase maior para as classes: dos elastômeros, termoplásticos e polímeros reativos (onde estes podem ter comportamento elastomérico e ser termoplástico). Conclui-se o capítulo com uma análise de pesquisas feitas utilizando alguns polímeros reativos, não reativos e ácido polifosfórico, utilizados de forma individual ou combinados como modificador de ligantes, sobre o ponto de vista da reologia do ligante asfáltico ou sobre o comportamento da mistura asfáltica contendo esses ligantes modificados.

2.1 Revestimento asfáltico

Segundo Bernucci (2007) a maioria dos pavimentos brasileiros são do tipo flexíveis e uma das camadas que formam este tipo de pavimento é a camada de revestimento, formada por uma mistura de agregados minerais graúdos e miúdos e por ligantes asfálticos, que de forma adequadamente proporcionada e processada garante ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local.

Para o DNIT(1996), os revestimentos asfálticos são constituídos pela associação de agregados e materiais betuminosos, e pode ser feito de duas formas: por penetração ou por mistura.

O revestimento asfáltico por mistura é feito por meio da mistura de agregados graúdos, miúdos e ligante asfáltico. O concreto asfáltico é então transportado até o local de aplicação, sendo transferido para uma unidade de aplicação (vibro acabadora) que distribuirá a mistura na pista para então ser compactada. De acordo com o processo

construtivo, os revestimentos por misturas podem ser ainda classificadas como pré-misturada a frio (esse tipo só será possível se se o tipo de agregados e ligantes a serem utilizados na mistura asfáltica permitirem que a mistura e o espalhamento da mistura seja feita à temperatura ambiente) e pré-misturada a quente (quando é necessário o aquecimento do ligante e do agregado para que seja realizada a mistura dos mesmos) (NEGRÃO, 2006).

Alguns processos de modificação dos ligantes têm por objetivo fazê-lo tornar-se um material mais rígido ao receber esforços, conseqüentemente sofrendo menos deformações, e mais flexível ao aliviar os mesmos esforços, ou seja, apresentar maior recuperação elástica. Outros objetivos principais na modificação do CAP são: elevar a coesão do material; reduzir a susceptibilidade térmica; baixar a viscosidade à temperatura de aplicação; resultar em CAP de baixa fluência; apresentar elevada resistência à deformação plástica, fissuração e fadiga; garantir boa adesividade e melhor resistência ao envelhecimento (BALBO, 2007).

2.2 Principais defeitos dos revestimentos asfálticos

Com o aumento do volume de tráfego nas últimas décadas tem aumentado as solicitações aos pavimentos e com isso a necessidade de se investir no desenvolvimento de pavimentos mais resistentes as cargas provenientes do tráfego e as intempéries do clima. A “vida de serviço” ou “vida útil” do pavimento, é o período no qual ele oferece boas condições de desempenho e qualidade ao usuário. As principais falhas que podem ocorrer e levar a redução da vida de serviço de um pavimento asfáltico são: deformação permanente (afundamento de trilha de roda), trincas por fadiga e trincas de origem térmica (LESUEUR, 2009).

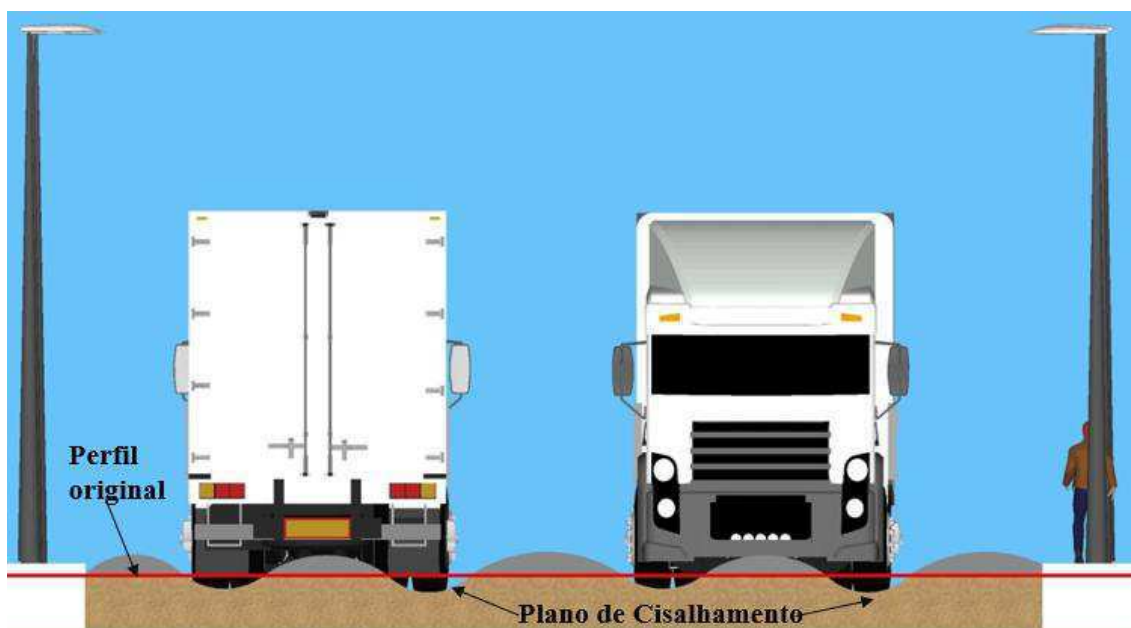
A deformação permanente consiste no acúmulo de pequenas deformações que se iniciam a partir do início da ação do tráfego e sua progressão pode ser dada pelo enfraquecimento do pavimento ao trincamento. A consequência da deformação permanente é o afundamento das trilhas de roda nos pavimentos. Esse tipo de falha no pavimento é típico de regiões que possuem altas temperaturas, a aplicação de cargas podem levar ao acúmulo de pequenas deformações plásticas na superfície do pavimento. Por essa razão, uma das maneiras de combater a deformação permanente na camada de revestimento é proporcionando ao ligante asfáltico maior resistência, para isso é preciso que este ligante seja mais rígido e/ou mais elástico, permitindo que após a aplicação de

carga o mesmo retorne à posição inicial após dissipação da mesma (SOBREIRO, 2014). Vários fatores podem contribuir para o surgimento dos defeitos no pavimento: projeto, execução das camadas, suporte das camadas que compõem o pavimento dentre outros.

Para o DNIT(2003), a deformação permanente é caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de levantamento, podendo ainda apresentar-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação. Com tudo pode-se dizer que a deformação permanente ocorre em decorrência da deformação viscosa do ligante asfáltico, juntamente com a deformação plástica da estrutura mineral (material pétreo) da mistura asfáltica, isto para problemas estruturais, mas este tipo de defeito pode ser ocasionado por problemas não ligados a estrutura do pavimento e sim por problemas funcionais.

No que diz respeito ao ligante para diminuir o surgimento desse tipo de defeito na camada de revestimento é necessário aumentar a resistência ao cisalhamento, para isso no que diz respeito ao ligante é importante que o mesmo seja rígido e elástico o suficiente para que ao ser aplicado carregamento, a mistura asfáltica seja, igualmente resistente e elástica o suficiente para que após solicitação retorne a sua posição original, evitando a deformação plástica na camada. Na Figura 1 é apresentado um esquema da ocorrência da deformação permanente por afundamento da trilha de roda.

Figura 1 - Deformação permanente por afundamento da trilha de roda



Fonte: Autora (2018)

Outro tipo de falha comum nos pavimentos são as trincas por fadiga, também está relacionada ao tráfego, onde a falha no pavimento pode surgir devido a aplicação de cargas repetidas. Esse fenômeno pode ser entendido como o comprometimento do pavimento devido as tensões provocadas pelo fluxo de veículos, chegando a provocar a perda de resistência da camada de revestimento, levando à formação de trincas superficiais. Apesar de ser considerado um defeito de superfície por se originar e se desenvolver dentro ou próximo da camada de revestimento, não significa que os outros componentes da estrutura não tenham influência no seu desenvolvimento.

Segundo Shell (2003), a fadiga de um pavimento flexível provoca trincas, que possuem duas fases principais: (1) trincamento inicial e (2) propagação das trincas. As trincas surgem devido as tensões geradas pelo tráfego e pela variação de temperatura e práticas de construção. A trinca de origem térmica é mais provável de ocorrer em regiões de clima frio, onde o asfalto apresenta um estado vítreo que reduz sua capacidade de dissipação de carga (LESUEUR, 2009).

2.3 Reologia de ligantes asfálticos

Segundo Sobreiro (2014), a definição de reologia como “estudo da deformação e fluxo da matéria” foi proposta pela Sociedade Americana de Reologia por ocasião de sua fundação, em 1929. Estejam os materiais estudados na forma de líquido ou sólido, serão

estudados em termos de elasticidade e viscosidade. Por ser um material viscoelástico, o ligante asfáltico pode apresentar tanto um comportamento elástico como viscoso, ou ambos, esses comportamentos serão influenciados pela temperatura em que os mesmos estejam submetidos. Por isso que a forma de estudo dos materiais sob o ponto de vista da reologia, está relacionada à relação tensão versus deformação (ou mudança de forma), assim como o tempo de aplicação de carga e temperatura. O conhecimento dessas propriedades podem contribuir para compreender o desempenho do ligante asfáltico puro e modificado, quando submetidos à tensão decorrentes do tráfego de veículos.

A importância da reologia dos ligantes asfálticos se dá pelas seguintes razões segundo Mothé (2009):

- Relacionar as propriedades reológicas com os defeitos na camada de revestimento do pavimento;
- Diferenciar os asfaltos vindos de diferentes petróleos e diferentes processos de refino;
- Ajudar na seleção das temperaturas para as operações de usinagem e compactação da camada de revestimento asfáltica.

Existem métodos empíricos de reologia para avaliação de ligantes asfálticos, como por exemplo penetração, ponto de amolecimento, viscosidade Sayboltfurol, recuperação elástica e ductibilidade, apesar de serem ensaios antigos em sua maioria ainda são muito utilizados no Brasil. No entanto já existem novas especificações para avaliação do ligante asfáltico, como as conhecidas por SUPERPAVE, que apresentam procedimentos diferenciados de ensaios de ligante e mistura.

Além de avaliar o desempenho mecânico do ligante asfáltico seja ele puro ou modificado sobre o ponto de vista da reologia é de suma importância estudar o comportamento mecânico da mistura, para avaliar como este ligante se comporta quando misturado com os agregados, compondo assim a mistura asfáltica. Diante disto, nesta pesquisa será estudado o comportamento dos ligantes puro e modificados e das misturas asfálticas com os respectivos ligantes e assim avaliar e prever com melhor confiabilidade o comportamento destes ligantes em campo na camada de revestimento do pavimento flexível.

2.4 Polímeros modificadores de ligantes asfálticos

A modificação dos ligantes asfálticos surgiram da necessidade de melhorar o desempenho e durabilidade dos pavimentos flexíveis, proporcionando assim o aumento da vida útil do pavimento e economia. Para Bernucci *et al.*, (2007), nem todos os polímeros podem ser adicionados ao ligante asfáltico. Assim deve existir cuidado na escolha do polímero a ser utilizado para evitar problemas de compatibilidade e estocagem do material.

Os polímeros são substâncias macromoleculares que podem ser obtidas de forma natural (madeira, óleo, fibra etc) ou podem ser obtidos artificialmente pela união de pequenas moléculas. Estas matérias são substâncias que podem ser classificados de maneiras diferentes, de acordo com a finalidade classificatória, as principais são:

- a) Quanto à ocorrência: Naturais ou Sintéticos;
- b) Quanto à Preparação: Adição e Copolímeros;
- c) Quanto à Cadeia: Homogêneos e Heterogêneos;
- d) Quanto à Estrutura: Lineares ou Tridimensionais;
- e) Industrial: Elastômeros, Plásticos e Fibras.

O aumento da temperatura em ligantes asfálticos modificados com polímero aumenta a velocidade das reações químicas. Os ligantes modificados por polímeros de uma forma geral são menos sensíveis a temperatura e essa é uma das vantagens oferecidas por esses modificadores. Para Negrão (2006) a temperatura na qual os polímeros são passíveis de sofrer reação química é aquela na qual os mesmos perdem sua resistência mecânica.

Os polímeros termosensíveis se classificam industrialmente como: plásticos. Fibras e elastômeros. No entanto, a classificação menos acadêmica e mais direcionada ao meio rodoviário, segundo DNIT(1998) são os polímeros termorrígidos, termoplásticos, elastômeros e elastômeros termoplásticos.

Os polímeros Termorrígidos não se fundem, degradam a uma determinada temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecido a uma temperatura

que depende de sua estrutura química (Negrão 2006). Exemplo tem-se a resina epóxi, poliuretano e outros. Os termoplásticos: são os polímeros que se fundem e se tornam maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Exemplo desse tipo de polímero tem-se o polietileno, o policloreto de vinila etc.

Os polímeros Elastômeros quando aquecidos se decompõem antes de amolecer, e apresentam propriedades elásticas que lembram a borracha. Como exemplo tem-se o SBR entre outros (DNER,1998). Já os elastômeros-termoplásticos: ao serem aquecidos se comportam como termoplásticos, mas em temperatura mais baixa apresentam propriedades elásticas. Tem-se como exemplo de polímero termo-plástico o SBS e o RET.

A utilização de polímero dos mais diversos tipos e categorias, é uma prática comum, pois várias pesquisas tem mostrado que a modificação do ligante tem proporcionado melhorias no desempenho da camada de revestimento asfáltica, devido principalmente ao aumento da resistência à deformação permanente, assim como também proporciona uma redução dos efeitos prejudiciais do envelhecimento do ligante asfáltico. Segundo Kalantar *et al.*, (2012) uma boa forma de melhorar o desempenho do ligante é otimizando suas propriedades reológicas e os matérias poliméricos são os principais modificadores. No entanto a escolha do material a ser utilizado será de acordo com o tipo de pavimento e de desempenho que se deseja obter. Para Zhu *et al.*, (2014) a modificação do ligante asfáltico pode não ser a melhor opção para melhorar a qualidade da Rodovia, pois o problema pode não está na camada de revestimento e sim nas camadas subjacentes.

Apesar das melhorias proporcionadas ao ligante asfáltico com a incorporação de polímeros, em muitos casos tem-se o comprometimento da trabalhabilidade da mistura durante a construção da camada de revestimento. Por essa razão uma das alternativas para tentar solucionar esse problema é acrescentar a mistura aditivos que melhorem o manuseio do material, atuando na viscosidade da mistura asfáltica sem comprometer a melhoria das propriedades reológicas. Dentre esses materiais pode-se citar o ácido polifosfórico, que tem sido bastante indicado por ser capaz de aumentar a qualidade do ligante modificado com polímero (SOBREIRO, 2014).

2.4.1 Principais polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos

Segundo Gama (2016), os polímeros mais utilizados atualmente na modificação de ligantes asfálticos são:

- Borrachas sintéticas, conhecidos como elastômeros termoplásticos (SBR ou tribloco SBS por exemplo);
- Copolímeros termoplásticos, por exemplo o copolímero de etileno-acetato de vinila (EVA) ou de moléculas relacionadas (etileno metacrilato, etileno butilacrilato, etc);
- Poliolefinas, como o polietileno (PE) e o polipropileno (PP);
- Copolímero que não são termoplásticos como etileno, glicil metacrilato (GMA) e um grupo éster (comumente metila, etila ou butilacrilato), referenciados como Terpolímeros Reativos e Etileno (RET), devido a supostas reações químicas que ocorrem entre o ligante e o polímero.

Segundo Zhu *et al.*, (2014) o uso de polímeros sintéticos na pavimentação asfáltica teve seu início após a Segunda Guerra Mundial. Desde então pesquisas (GAMA,2016; SHIVOKHIN *et al.*, 2012; POLACCO *et al.*, 2004) foram e estão sendo realizadas na intenção de melhorar ainda mais a qualidade dos pavimentos e as condições de rolamento para os usuários.

Existem polímeros que ao serem misturados ao ligante asfáltico ocorre reação química, mas também existem polímeros que ao serem misturados com o ligante a mistura é apenas física. Para Shivokhin *et al.*, (2012) os polímeros utilizados na pavimentação asfáltica como modificador do ligante, são classificados como “ativos” ou “passivos”, referindo a compatibilidade entre os polímeros e os ligante. Os passivos são os polímeros que ao serem misturados com o ligante não reagem quimicamente ocorrendo apenas uma mistura física, os mais utilizados na pavimentação são: SBS, SBR, PE e EVA, já os polímeros ativos são os que reagem quimicamente com o ligante asfáltico ao ser misturado, por exemplo de polímero reativo aplicado na pavimentação são os polímeros a base de Metracrilato de Glicidila (GMA). No Brasil os polímeros mais utilizados na modificação de ligante asfáltico são: SBS, SBR, EUA e do tipo reativo (RET) (NEGRÃO, 2006).

2.4.2 Uso de Polímeros elastômeros termoplásticos

Elastômeros Termoplásticos é a classe de mais utilizada em todo o mundo na pavimentação asfáltica, e por essa razão é a mais estudada na academia científica e pela indústria. O polímero mais conhecido desta classe é o copolímero tribloco de estireno e butadieno SBS (AIREY, 2003). No Brasil este elastômero é bastante utilizado e foi adotado pela ANP n° 32 como padrão para as especificações de ligantes elastomérico modificado. Segundo a classificação da ANP n° 32 de 2007 para um ligante asfáltico ser considerado elastomérico, devem estar incluso em uma das três classe: 50/77-E; 60/85-E ou 65/90-E. Essa classificação é feita numericamente, através do Ponto de Amolecimento mínimo (°C) e pela Recuperação Elástica (RE) mínima à 25°C (%). Essas especificações da ANP n°32 de 2007 foram normatizadas pela DNIT 129/2011. As especificações podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites da resolução n°32 da ANP para ligantes 60/85-E

Ensaio na amostra	Métodos	Limites
Penetração 25°C, 5s, 100g, dmm	NBR 6576	40-70
Ponto de Amolecimento mín., °C	NBR 6560	60
Viscosidade Brookfield a 135°C, <i>spindle</i> 21, 20 rpm, máx., cP	NBR 15184	3000
Viscosidade Brookfield a 155°C, <i>spindle</i> 21, 50 rpm, máx., cP	NBR 15184	2000
Viscosidade Brookfield a 175°C, <i>spindle</i> 21, 100 rpm, máx., cP	NBR 15184	1000
Ponto de Fulgor, mín	NBR 11341	235
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15166	5
Recuperação elástica a 25°C, 20 cm, mín., %	NBR 15086	85
Variação de massa, máx., %	ASTM D2872	1
Variação do Ponto de Amolecimento, °C, máx.	NBR 6560	-5 a +7
Percentagem de Penetração original, mín.	NBR 6576	60
Percentagem de Recuperação Elástica Original a 25 °C, mín	NBR 15086	80

No Brasil o polímero do tipo RET foi introduzido no mercado brasileiro no segundo semestre de 2002 e, nesta ocasião, foi executado em um segmento experimental na SP-330-Rodovia Anhanguera, qual é administrada pela concessionária AutoBan (NEGRÃO, 2005).

Segundo Fernandes *et al.*, (2008) no que diz respeito aos ensaios convencionais de reologia, a modificação do ligante com a adição do copolímero SBS apresentou uma redução da penetração, com o aumento da rigidez e aumento do ponto de amolecimento, com esses resultados é possível prever no que diz respeito a contribuição mecânica do

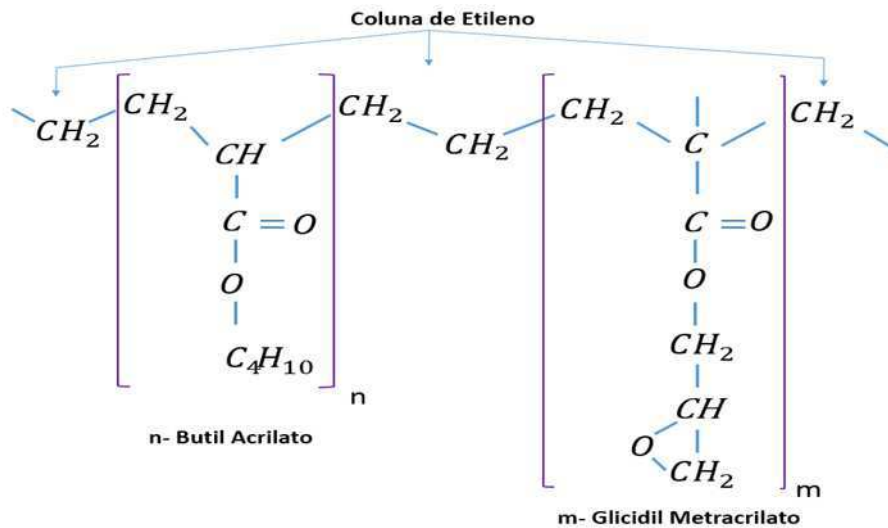
ligante asfáltico na mistura, uma redução nos problemas de plastificação e deformação do pavimento por escoamento dos ligantes.

Um outro ponto de interesse a ser observado nos ligantes asfálticos quando modificados com o SBS houve aumento da resistência ao envelhecimento que ocorre no material na usina e na aplicação em campo. Quanto às propriedades convencionais Domingos e Faxina (2013) observaram em pesquisas anteriores a esta que a adição do copolímero SBS no ligante asfáltico reduziu a sensibilidade do ligante modificado ao envelhecimento a curto prazo quanto ao ponto de amolecimento e a penetração retida. Apesar de o polímero SBS ser muito utilizado pela indústria de ligantes modificados para aplicação em pavimentos asfálticos, existem desvantagens relacionadas ao seu uso, as principais dela é o alto custo e a separação de fase (GAMA, 2016). Por ser o modificador asfáltico mais utilizado na modificação de ligantes e apontado como o melhor em termos de desempenho, existem pontos que devem ser estudados pois são considerados pontos de falha.

Em 2008 o mercado de SBS foi atingido por uma queda de suprimento de betume, o que afetou a produção de ligantes modificados por SBS em todo o mundo. A AMAP (The Association of Modified Asphalt Producers) divulgou uma lista de modificadores de ligante como alternativa em caso de futuros problemas de suprimento. Alguns dos materiais citados foram: EVA (Copolímero de Etileno Acetato de Vinila); PPA (Ácido Polifosfórico) podendo ser utilizado como modificador junto ao SBS ou como catalizador com o polímero RET (Termolímero Elastomérico Reativo).

Como alternativa para solucionar os problemas de estabilidade dos oleofínicos, no final dos anos 80 foram desenvolvidos copolímeros a base de etileno, contendo anéis epóxi em sua cadeia, sendo atualmente comercializados como terpolímeros randômicos de etileno, metacrilato de glicidila (GMA) e um grupo éster (normalmente, etil ou butil acrilato) (POLACCO *et al.*, 2004). Na Figura 2 é apresentado a estrutura química do RET.

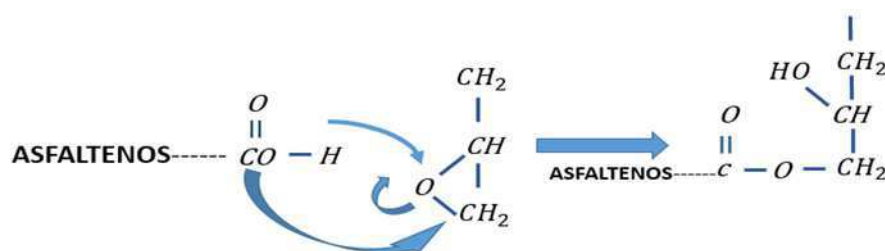
Figura 2 - Representação química do polímero RET



A classificação de terpolímero significa que a cadeia possui três tipos de monômeros diferentes na cadeia.

A reação química que ocorre entre o RET e o asfalto presente no ligante asfáltico está representado na Figura 3.

Figura 3 - Reação do asfalto com o polímero do tipo RET



A reação entre o polímero RET e o asfalto (do ligante asfáltico) se dá através do copolímero Glicidil Metacrilato e esta é uma reação de adição e portanto não gera subproduto como vapor d'água ou gases voláteis.

Gama *et al.*, (2016) realizaram o uso do polímero reativo POLIMUL S-74 (Metacrilato de Glicidila-GMA). O teor de polímero adicionado foi de 1,8%. Um dos objetivos do estudo era avaliar se o CAP 50/70 modificado por este polímero reativo

poderia ser classificado segundo as especificações da ANP n° 32 para ligantes elastoméricos 60/85-E.

Bulatovic *et al.*, (2014), observaram que o ligante modificado aumenta a recuperação elástica a altas temperaturas, essas análises foram realizadas a partir dos ensaios de reologia. Além disso, os ligantes estudados nesta pesquisa foram estocados a elevada temperatura para observar separação de fase pela diferença de ponto de amolecimento. Os ligantes apresentaram ótimo desempenho à estocagem graças à reação química entre o ligante e o terpolímero RET. Apesar do bom desempenho do ligante modificado com polímero a base de GMA, é destacado na pesquisa o cuidado que se deve ter com a gelificação de certos ligantes asfálticos pela adição de maiores teores de terpolímero reativo, que no caso dos estudos de Bulatovic *et al.*, (2004) ocorreu com 1,9% de EBA-GMA.

2.4.3 Polímeros não reativos

Segunda principal categoria de polímeros mais utilizados para modificação do ligante asfáltico (POLACCO *et al.*, 2015). Pôr a mistura do polímero não reativo ao ligante asfáltico ocorrer sem reação química, não é preciso controle da reação como ocorre com os ligantes reativos, tornando a mistura mais prática. Neste grupo existem os termoplásticos que são a segunda principal categoria de polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos. Possuem um menor custo que os elastômeros termoplásticos, porém são muito diferentes em termos de desempenho, isto ocorre por sua mistura com o ligante ser apenas física, sem que ocorra nenhuma reação química.

A classe de termoplásticos possuem uma característica de “plasticidade”. Polímeros desta classe apresentam quando usados na camada de revestimento asfáltica aumento da rigidez e melhorias das deformações plásticas sobre as cargas de tráfego (POLACCO *et al.*, 2015). As poliolefinas são uma categoria do grupo dos termoplásticos e são muito estudadas na modificação de ligantes asfálticos.

Segundo Polacco *et al.*, (2005) devido aos benefícios e ao baixo custo, vários materiais da categoria das poliolefinas, já foram e são estudados para modificar asfalto, alguns desses materiais são: polietileno (PE). Polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (HDPE ou PEAD) e polietileno de baixa densidade linear (LLDPE ou

PELBD). A compatibilidade das poliolefinas com os ligantes asfálticos é baixa, devido a natureza não polar e aromática desses materiais.

Pérez-Leme *et al.*, (2006) estudou misturas de HDPE a ligante asfáltico e analisou diversas misturas com variados teores de HDPE, variando de 1% a 5% por peso de HDPE e realizou testes de estabilidade a estocagem. Nas análises reológicas feitas antes e após a estocagem constataram que há uma clara diferenciação entre as propriedades reológicas dos ligantes modificados após a estocagem. Observaram um elevado grau de inchamento do polímero que mesmo misturado a alta temperatura, o polímero não se envolve na matriz do ligante asfáltico.

Gama *et al.*, (2016) avaliaram misturas asfálticas modificados com o teor de 0,3% de HDPE e observaram que antes e após o RTFO as misturas apresentaram um aumento de rigidez e não apresentou recuperação elástica, confirmando que este tipo de mistura não tem característica elastomérica. Apesar dos bons resultados das misturas com incorporação de HDPE, os autores observaram que quando associados ao ácido polifosfórico e ao polímero reativo os resultados reológicos foram superiores.

2.4.4 Ácido polifosfórico como modificador de ligantes asfálticos

O ácido polifosfórico (PPA116%) é um oligômero do ácido fosfórico, a produção de PPA com um grau de pureza elevado pode ser feito tanto pela desidratação do ácido fosfórico quanto pelo aquecimento de pentóxido de fósforo disperso em ácido fosfórico (MASSON, 2008).

Segundo Baugardnet *et al.*, (2005) a primeira patente (US3751278⁵) que descreve as modificações do ligante asfáltico com a adição de ácido fosfórico, foi publicada em 1973. Desta forma, desde os anos 1970 o PPA tem sido utilizado como um modificador não polimérico de ligantes asfálticos, proporcionando melhoria nas propriedades reológicas, como aumento na temperatura alta do grau de desempenho (PG) a alta temperatura (FEE *et al.*, 2010; D'ANGELO, 2012; PAMPLONA, 2013), acréscimo do ponto amolecimento e redução dos valores de penetração e aumento dos valores de viscosidade rotacional (ORANGE *et al.*, 2004, LEITE *et al.*, 2004).

A modificação do ligante asfáltico pode ser realizada por qualquer ácido fosfórico. Existem vários graus de ácido fosfórico encontrados no mercado, contendo diferentes

quantidades de ácido ortofosfórico, tais com 50; 75; 85 e 100%. No entanto os ácidos polifosfóricos podem conter quantidades de 105 a 116% de ácido (ARNOLD, 2008).

O composto básico utilizado para a produção de ácido polifosfórico (PPA) é o pentóxido de fósforo (P_2O_5) e o ácido fosfórico (H_3PO_4), sendo disponível em vários graus. No entanto, o grau pode gerar confusão, pois pode exceder os 100%. Na Tabela 2 são apresentados alguns exemplos.

Tabela 2 - Graus do ácido fosfórico

Ácido Fosfórico	Fórmula	P_2O_5 (%)	Ácido Fosfórico (%)
Orto	H_3PO_4	72,4	100
		75,9	105
Piro	$H_4P_2O_7$	79,4	110
Tri	$H_5P_3O_{10}$	82,6	114

Na Tabela 2, pode ser observado que o ácido ortofosfórico (100%) contém 72,4 % de P_2O_5 calculado a partir da relação do peso molecular de $\frac{P_2O_5}{H_3PO_4}$. O grau de ácido fosfórico é obtido pela relação entre os teores de P_2O_5 do ácido em questão com o P_2O_5 do ácido ortofosfórico (100%). Desta forma, para o ácido pirofosfórico a relação 79,4 / 72,4 determina o grau de ácido fosfórico de 110% (MASSON, 2008). Este método de cálculo é aplicado para todos os ácidos existentes, inclusive o PPA116%.

Vários estudos foram realizados objetivando esclarecer melhor o mecanismo de interação entre o ligante asfáltico e o modificador (PPA). Pamplona et al., (2012) avaliaram o efeito da adição de teores de PPA (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0) ao ligante asfáltico de diferentes fontes, com diferentes composições químicas e de diferentes graus de desempenho. Essas amostras de ligantes modificados foram submetidas a ensaios de reologia para determinação do PG (Grau de Desempenho) e ao ensaio de MSCR. Com isso os autores observaram que em função da sua composição química, alguns ligantes adquiriram maiores ganhos com menor consumo de ácido polifosfórico (PPA), enquanto que outros ligantes necessitam de maior consumo de PPA.

Gama *et al.*, (2016) por meio de estudos de ensaios reológicos, observou que a modificação de ligantes asfálticos com PPA leva ao aumento da rigidez do ligante, pelo aumento da viscosidade e ponto de amolecimento. Desta forma os autores concluem que a modificação do ligante melhora a resistência a deformação permanente, principalmente a elevadas temperaturas.

Para Pamplona *et al.*, (2013) ao avaliar curvas de vida de fadiga, observou que a medida que houve o aumento da deformação aplicada, os ligantes modificados com o PPA passaram a ser mais sensíveis e portanto resistiam menos a deformação, diminuindo a vida de fadiga. Conclui-se, portanto, que o uso do ácido polifosfórico se mostra favorável nos casos em que o pavimento esteja sujeito a pequenas deformações, ou seja pavimentos sujeitos a deformações elevadas não seriam beneficiados por este modificador.

Estudos feitos por vários autores como Kodrat *et al.*, (2007); Martin *et al.*, (2006) e Gama *et al.*, (2016) apontam que o uso do ácido polifosfórico não está restrito a modificação individualmente, a adição do PPA pode ser feita também como acelerador da reação química entre o terpolímero reativo e o ligante asfáltico, resultando também na diminuição do teor de polímero ou chegando a combinar com outros polímeros como por exemplo o SBS.

Como dito anteriormente, os ligantes asfálticos podem ser modificados por diversos tipos de polímeros reativos ou não e por ácidos polifosfóricos de forma individual ou em conjunto. Para Lesuer (2009) o uso do ácido polifosfórico ao ligante já modificado por polímero, pode ser mais eficiente que o uso destes modificadores separadamente.

Estudos realizados por Domingos e Faxina (2013), mostraram que a adição de teores de ácido polifosfórico (0,5%) ao ligante asfáltico já modificado por SBS possibilitou diminuir 1,5% do teor de SBS, preservando o PG (Performance Grade), mesmo com a redução do teor de polímero. Os ligantes asfálticos modificados com SBS e ácido polifosfórico, apresentaram melhor comportamento frente à susceptibilidade à deformação permanente quando comparados com ligantes modificados somente com o copolímero SBS. Segundo Domingos e Faxina (2015) as propriedades de recuperação elástica e fluência através do ensaio MSCR para um ligante modificado por 1,3% de ácido polifosfórico (PPA) e comparou com outro ligante modificado com a composição de 1,3% de Evaloy EP4170 (polímero reativo) e 0,3% de PPA. As análises foram realizadas

com várias temperaturas. Os resultados mostraram que as modificações apresentaram melhoras nas propriedades estudadas do ligante, melhorando a elasticidade e o ligante modificado pela adição de RET e PPA apresentou resultados mais expressivos, segundo os autores o ácido polifosfórico ajudou a manter o comportamento elástico mesmo com o aumento da temperatura e variação de tensão aplicada.

Polacco *et al.*, (2015) propuseram que a combinação de poliolefinas com RET, podendo ser estudada como forma de obter o benefício de estabilizar a poliolefina à estocagem e otimizar o uso do RET. No entanto Segundo Gama (2016) essa combinação não havia sido testada até Varela *et al.*, (2016) estudar e propor a co-modificação do polímero RET à base de GMA (Polimul S74) com diferentes teores de HDPE (Polimul SX-500) de 0,1 a 1,0%, utilizando ainda o ácido polifosfórico como catalizador.

O resultados de Varela *et al.*, (2016) avaliaram as propriedades reológicas e observaram que os modificadores ao serem adicionados ao ligante asfáltico modificaram suas propriedades elásticas e de rigidez, houve ainda aumento da consistência do ligante asfáltico e de seu ponto de amolecimento. No entanto os autores constaram que devido a alta consistência viscosa da mistura asfáltica podem ser necessárias altas temperaturas de usinagem e compactação, podendo assim dificultar a trabalhabilidade com o ligante.

Grande (2011) estudou as propriedade mecânicas de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados com diferentes teores de ácido polifosfórico (PPA) e com isso observou que ocorreu quando comparado com o ligante puro um aumento da rigidez, na flexibilidade, na resistência à tração e diminuição da susceptibilidade ao dano por umidade nas misturas com o ligante modificado. Já Nuñez *et al.* (2012), estudou o comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados pelo copolímero SBS, com e sem a adição de PPA, observou que houve também aumento da rigidez e da resistência a tração, sendo que as misturas que continham ligante modificado com SBS e PPA apresentaram um aumento de 50% a mais no resultado da resistência a tração, quando comparado com a mistura de referência. Na avaliação do dano à umidade das misturas, o autor verificou que as misturas com ligante modificado são pouco susceptíveis à umidade.

Bernnet & Martin (2012) avaliaram as propriedades mecânicas de misturas asfálticas, com ligantes asfálticos modificados com 4,25% SBS, sem a presença de ácido e com a presença do ácido polifosfórico (0,5% PPA+2,5% SBS), no estudo os autores

concluíram que a resistência a deformação permanente e a fadiga foram semelhantes para as misturas estudadas. Apesar do resultado dos ensaios mecânicos das misturas terem dado semelhantes, os ensaios que avaliaram os ligantes modificados (MSCR), apontaram maior tolerância à deformação permanente para o ligante modificado com apenas o copolímero SBS.

Segundo Sobreiro (2014) foram realizadas pesquisas em Otário, mediante pista experimental, sugeriram que o uso do ácido polifosfórico (PPA) pode prevenir as trincas longitudinais que podem ocorrer entre as faixas de tráfego, dependendo da formulação utilizada. A pista experimental foi construída no Canadá, no ano de 2003 e foi feita uma avaliação após três anos de concluída, foi observado que não ocorreu nenhum tipo de trincamento no pavimento e também foi observado o bom desempenho das misturas modificadas.

Gama (2016) avaliou o comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados com 1,8%S74+0,3%SX500+0,15%PPAe comparou os resultados obtidos com misturas asfálticas com ligante puro. Conclui-se que a resistência a deformação permanente, a tração e a resistência a fadiga das misturas com o ligante modificado foram bem melhores, chegando a apresentar uma resistência à deformação permanente 34 vezes maior do que a mistura de referência. Também foi observado na pesquisa a melhora da elasticidade da mistura, estudado através do ensaio de módulo dinâmico (MD). Com essa análise foi verificado que a mistura com o ligante modificado sob elevado volume de tráfego e alta temperatura a mistura mantém sua elasticidade e diminui a rigidez, enquanto que sob baixo volume de tráfego a mesma se mantém mais rígida, evitando assim a deformação permanente.

2.4.5 Considerações finais da fundamentação teórica

Nesta revisão foi possível observar a importância dos polímeros reativos, não reativos e do ácido polifosfórico, como alternativas de modificadores para o ligante asfáltico, por apresentarem estabilidade a estocagem, devido a ocorrência de reação química entre o ligante asfáltico e o modificador. Contudo, problemas de gelificação do ligante restringem os teores que podem ser utilizados, tornando o desempenho desses modificadores inferior à dos elastômeros termoplásticos. Desta forma, a proposta desta pesquisa é o uso combinado de um polímero reativo EMA-GMA com um polímero não

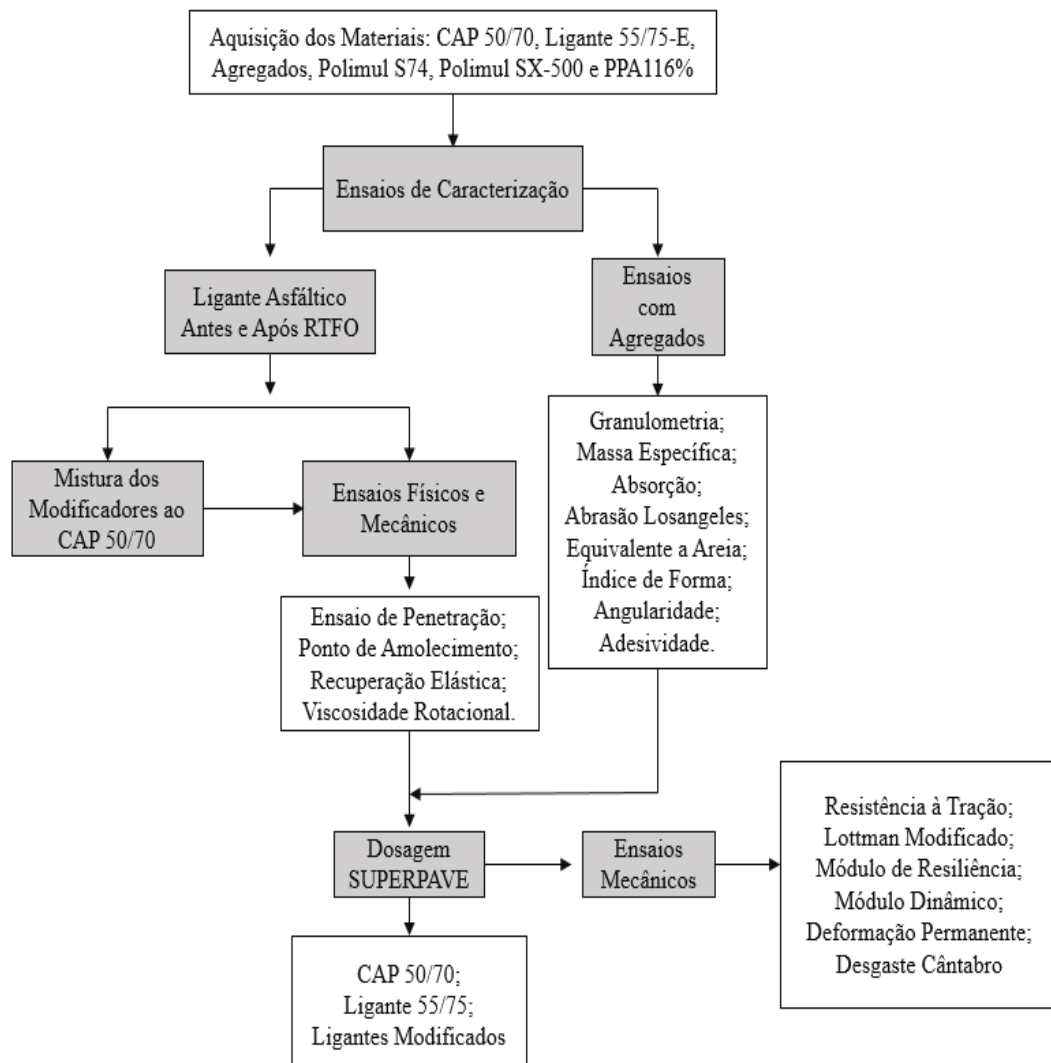
reativo (poliolefina HDPE) associados a incorporação de ácido polifosfórico (PPA 116%) ao ligante asfáltico convencional 50/70.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contém informações sobre os procedimentos de laboratório adotados e os resultados obtidos com a caracterização dos materiais utilizados (agregado e ligante), que serviram como informações preliminares para as etapas de análise do comportamento mecânico das misturas asfálticas. As atividades foram realizadas segundo o que está descrito no fluxograma da Figura 4, em conformidade com órgãos reguladores Nacionais e Internacionais (ABNT, DNIT, AASHTO e ASTM).

Figura 4 - Fluxograma de ensaios



O método experimental foi dividido em três etapas. A primeira foi a caracterização e posterior classificação dos materiais utilizados (ligantes asfálticos, agregados graúdos e miúdos). Esse estudo foi de grande importância para o conhecimento dos materiais e fundamental para a etapa seguinte, a de dosagem da mistura asfáltica, e posteriormente os ensaios mecânicos, concluindo com as análises dos resultados. Todas essas etapas serão detalhadas neste capítulo. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP sediado na Universidade Federal de Campina Grande.

3.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados foram: CAP 50/70, CAP 55/75, agregados graúdos Brita 19mm, 12,5mm e agregados miúdos areia e o pó de pedra. Foram utilizados também dois polímeros (PolimulS74, PolimulSX500) e um ácido polifosfórico (PPA116%).

3.1.1 Ligante asfáltico

Os ligantes asfálticos utilizados nesta pesquisa foram: o ligante puro 50/70 cedido pela empresa Rocha Cavalcante, o ligante modificado 55/75 cedido pela empresa JBR Engenharia.

Os Ensaios de reologia empírica e de misturas asfáltica, foram realizados na Universidade Federal de Campina Grande.

3.1.2 Modificadores do ligante asfáltico

Foram utilizados nesta pesquisa, ácido polifosfórico e dois tipos de polímero:

- a) Ácido Polifosfórico (PPA) a 116%;
- b) Terpolímero Reativo (RET) de Etileno Acrilato de Metila e Metacrilato de Glicidila (EMA-GMA), com teor de GMA de 6%, comercialmente denominado Polimul S74®;
- c) Polietileno de Alta Densidade (PEAD), comercialmente denominado Polimul SX-500®;

Os modificadores foram fornecidos pela PRANA Petroquímica Ltda.

3.2 Métodos

A avaliação do desempenho dos ligantes, foi realizada a partir da caracterização empírica, ensaios com agregados e testes mecânicos em amostras dosadas segundo a metodologia SUPERPAVE.

3.2.1 Composição dos ligantes asfálticos com os modificadores

Com o intuito de analisar se os ligantes modificados se caracterizavam como ligantes elastoméricos do tipo 60/85-E foi utilizado como parâmetro as especificações da resolução n° 32 de 21 de setembro de 2010 da Agência Nacional de Petróleo (ANP) – Regulamento técnico ANP n° 04/2010 para ligantes asfálticos elastomérico.

3.2.2 Determinação do teor de polímero reativo e não reativo

Pesquisas realizadas utilizando polímero reativo na modificação de ligantes asfálticos sugerem que esteja na faixa de 1,5 a 2,5% por peso de material para que as propriedades elásticas sejam alcançadas com segurança sem que ocorra comprometimento do ligante. O polímero reativo Polimul S74®; foi utilizado o teor de 1,8 com base em pesquisas bibliográficas (PALACCO *et al.*, 2015; GAMA *et al.*, 2016; VARELA *et al.*, 2016).

O polímero não reativo Polimul SX500® foi utilizado como co-modificador para o ligante junto ao Polimul S74® e o Ácido Polifosfórico (PPA106%). Com base em pesquisas anteriores a utilização deste polímero se deu no teor de 0,3% (GAMA *et al.*, 2016) por peso de ligante.

3.2.3 Determinação do teor de ácido polifosfórico

O ácido polifosfórico foi utilizado de forma a otimizar o uso do Polimul S74®, nos teores de 0,15%, 0,3% e 0,5% por peso de ligante. Os dois primeiros teores foram estudados por Gama (2016), analisando o comportamento mecânico dos ligantes e apenas o comportamento mecânico da mistura com o teor de 0,15% PPA. Nesta pesquisa o teor de 0,15% PPA foi novamente testado para análise do comportamento do ligante e da mistura asfáltica com outros tipos de agregados. Foram estudados também os teores 0,3% e 0,5% PPA, para avaliar o comportamento mecânico com teores mais elevados de ácido polifosfórico (PPA).

3.2.4 Determinação das composições de mistura

Para o desenvolvimento da pesquisa as misturas CAP-polímeros foram realizadas adicionando ao CAP puro 1,8% do Polimul S74, 0,3% do Polimul SX500 e 0,15; 0,3 e 0,5% do PPA.

Para avaliar as propriedades mecânicas do ligante convencional 50/70 do ligante modificado 55/75 e do ligante 50/70 modificado por polímeros e ácido polifosfórico, cada um com os seus respectivos teores de modificadores, foram divididos em grupos conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Ligantes e teores de polímeros utilizados na modificação do ligante asfáltico.

Grupos	Polimul S74	Polimul SX 500	PPA 116%	Ligante Asfáltico 50/70	Ligante Asfáltico 55/75
A	–	–	–	100%	–
B	–	–	–	–	100%
C	1,80%	0,30%	0,15%	97,75%	–
D	1,80%	0,30%	0,30%	97,60%	–
E	1,80%	0,30%	0,50%	97,40%	–

O grupos foram nomeados de “A” a “E” conforme detalha na Tabela 1: (i) Ligante puro 50/70, denominado “A” utilizado como base para verificação do efeito dos modificadores; (ii) Amostra “B” Ligante modificado 55/75 já encontrado no mercado utilizado também como base para verificação do efeito dos modificadores; (iii) Amostras “C”, “D” e “E” fixando 1,8% de Polimul S74® e Polimul SX-500® e variando o teor de 0,15%, 0,3% e 0,5% de PPA respectivamente.

A mistura asfáltica dos polímeros e do ácido com o ligante asfáltico puro foi realizada em laboratório utilizando um agitador mecânico com rotação de 500rpm. O ligante asfáltico foi aquecido a uma temperatura entre 160 - 165°C essa temperatura foi mantida durante todo o processo. A ordem de adição dos modificadores ao ligante 50/70 se deu na ordem apresentada na Tabela 4, respeitando os tempos de mistura especificados. Todo esse processo de mistura teve como base a pesquisa Gama *et al.*, 2016.

Tabela 4 - Tempos de mistura dos polímeros Polimul S74, Polimul SX500 e PPA116%

Amostra	Polimul S74	Polimul SX 500	PPA 116%
A	–	–	–
B	–	–	–
C	1h	30min	30min
D	1h	30min	30min
E	1h	30min	30min

Após o processo de mistura, os ligantes com adição de Polimul S74®, Polimul SX-500® e PPA 116% foram submetidos a um processo de cura realizado em estufa a 160°C por 12 horas, para simular o processo industrial de espera para aplicação em campo (PÉREZ-LEPE *et al.*, 2006; JASSO *et al.*, 2015; GAMA *et al.*, 2016).

3.2.5 Ensaios com os ligantes

Foram realizados ensaios de caracterização física e reológica das amostras de CAP 50/70, CAP 55/75 e CAP modificado com diferentes teores de Polimul S74®, Polimul SX-500® e PPA 116%. Na Tabela 5 apresenta as normas utilizadas para a realização dos ensaios.

Tabela 5 – Normas dos ensaios de caracterização física e mecânico dos ligantes asfálticos

Ensaio	Métodos
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/04
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/2010
Penetração	DNIT ME 155/2010
Recuperação Elástica	DNIT ME 130/2010

3.2.5.1 Envelhecimento de ligantes asfálticos

O envelhecimento de um ligante asfáltico pode ser definido como sendo o processo de enrijecimento que o mesmo sofre durante a usinagem, estocagem, aplicação e em serviço, onde haverá alterações de suas características mecânicas além das químicas e reológicas podendo causar um aumento na sua consistência. Testes são feitos para avaliar as propriedades relacionadas a durabilidade do ligante asfáltico, nesta pesquisa foi feito o ensaio para simular o envelhecimento a curto prazo, este tipo de envelhecimento

ocorre durante a mistura do ligante com os agregados e durante a aplicação da mistura no pavimento.

3.2.5.2 Envelhecimento de ligantes asfálticos a curto prazo

Este tipo de envelhecimento é devido ao processo de usinagem, transporte e compactação da mistura asfáltica no pavimento flexível. Durante estas etapas, o ligante asfáltico é exposto à altas temperaturas. O ensaio que simula o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação a curto prazo é o Rolling Thin Film Oven Test (RTFO), regido pela ASTM D2572/2010. O envelhecimento é avaliado neste ensaio com base nas alterações das propriedades medidas antes e após o procedimento e pela porcentagem de massa antes e após o processo.

No ensaio RTFO, oito recipientes cilíndricos de vidro contendo 35 gramas de ligante são fixados em uma prateleira vertical rotativa (Figura 6). Durante este ensaio, o ligante asfáltico flui em volta da superfície interna de cada recipiente, com ar pré-aquecido periodicamente soprado dentro de cada um dos oito jarros já fixados. A amostra de ligante circula nestes recipientes durante 85 min à temperatura de 163°C. O efeito do envelhecimento do ligante é avaliado com base nas alterações das propriedades medidas antes e após o procedimento e pela porcentagem de massa antes e após o processo. Na Figura 5 é possível observar o equipamento que foi utilizado no envelhecimento a curto prazo dos ligantes estudados.

Figura 5 - Equipamento do RTFO (LEP/UFCG)



Fonte: Autora (2018)

3.2.6 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração classifica o ligante asfáltico quanto a sua dureza, é regido pela norma DNIT-ME 155/2010 ou NBR 6576/2007. Neste ensaio é determinado a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha da massa 100g penetra verticalmente em um volume padronizado de cimento asfáltico, com duração de cinco segundos em uma amostra de ligante a uma temperatura de 25°C. O ensaio de penetração foi realizado duas vezes, com cinco furos em cada amostra, para todos os tipos ligantes utilizados na pesquisa. O aparelho utilizado para a realização do ensaio é o Penetrômetro.

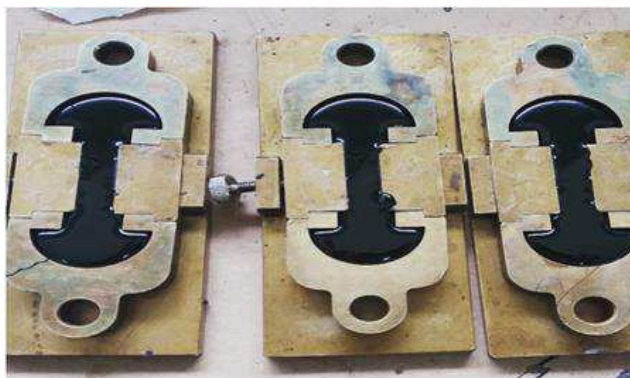
3.2.7 Ponto de amolecimento

Este ensaio é normatizado pelo DNIT ME 131/2010 ou pela NBR 6560/2008. Neste ensaio o ponto de amolecimento é a mais baixa temperatura na qual uma esfera metálica padronizada pesando 3,50g em média, atravessa um anel também padronizado e cheio com material betuminoso, percorrendo um deslocamento de 25mm, sob condições específicas encontradas na norma. O ponto de amolecimento será a média das temperaturas na qual as duas esferas, envoltas pelo ligante asfáltico deslocam-se e tocam a placa de fundo no aparelho de ensaio. Nesta pesquisa o ensaio foi realizado com duas esferas em cada amostra, e o resultado é a média desses valores.

3.2.8 Recuperação elástica

O ensaio de recuperação elástica é preconizado pela norma DNIT ME 130/2010 ou NBR 15086/2006. Esta medida mostra a capacidade que o ligante asfáltico possui de recuperação elástica, após a interrupção mecânica da tração à velocidade de 5cm/min e à 25°C, a amostra é seccionada ao meio e observa-se após 60 min a distância de retorno elástico obtida. O ensaio de recuperação elástica é utilizado como uma medida classificatória para ligantes elastoméricos, ou seja ligantes asfálticos que possuem em sua composição polímero elastomérico. Sendo assim Ligantes asfálticos puros possuem uma recuperação elástica próximo a zero. No ensaio a amostra de ligante asfáltico é tracionada a uma distância de 20 cm a uma velocidade de 5 cm/min, após a tração a amostra é cortada ao meio e observasse após 60 min a distância de retorno elástico obtida. A relação em porcentagem, da distância inicial e final após a recuperação é a recuperação elástica propriamente dita. Foram realizadas três medidas de recuperação elástica, na presente pesquisa sendo a média desses valores o resultado adotado. Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas algumas das etapas do ensaio de recuperação elástica.

Figura 6 - Ensaio de recuperação elástica



Fonte: Autora (2018)

Figura 7 - Ensaio de recuperação elástica



Fonte: Autora (2018)

3.2.9 Adesividade

As misturas asfálticas podem ter o seu comportamento mecânico influenciado pela umidade, de tal forma a comprometer a sua utilização na pavimentação. Essa influência da umidade pode provocar na mistura asfáltica a perda de adesão e coesão entre o ligante betuminoso e o agregado. A perda de adesão devido ao deslocamento do filme de asfáltico pela presença de água entre o asfalto e o agregado, e a perda de coesão se dá devido à perda de resistência e integralidade da mistura na presença de água.

A avaliação a susceptibilidade das misturas asfálticas à umidade são empregados, normalmente, dois ensaios em laboratório: o de adesividade do agregado graúdo DNER-ME 078/94 – e a resistência ao dano por umidade induzida nas misturas asfáltica (AASHTO T283, 1994).

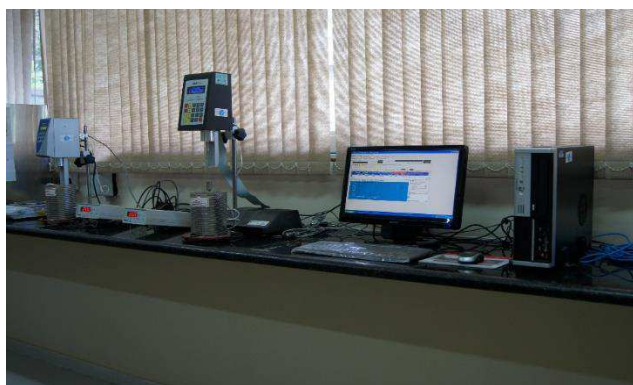
O ensaio de adesividade avalia visualmente o deslocamento da película de ligante asfáltico que recobre o agregado, quando a mistura agregado-ligante é submetida, a 40°C, à ação da água destilada, durante 72 horas.

3.2.10 Viscosidade rotacional

Importantes na caracterização dos ligantes asfálticos, sejam eles puros ou modificados, as medidas de viscosidade contém informações sobre as propriedades de processamento, misturas e até mesmo lançamento do ligante asfáltico. O ensaio para determinar a viscosidade dos ligantes asfálticos desta pesquisa, foi realizado em um viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, modelo DVII+ acoplado a um computador de temperatura thermosel (Figura 8).

O ensaio foi preconizado pela norma ABNT NBR 15184/2007, considerando as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C com velocidades de 20, 50, e 100 rpm, respectivamente. O equipamento Brookfield, tem a finalidade de determinar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos tanto convencionais quanto modificados durante o manuseio e a usinagem da mistura asfáltica a altas temperaturas.

Figura 8 - Viscosímetro rotacional Brookfield (LEP/UFCG)



Fonte: Autora (2018)

3.3 Dosagem superior performing asphalt pavements (SUPERPAVE)

A metodologia Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) foi desenvolvida pelo Strategic Highway Research Program (SHRP). O objetivo principal desta metodologia atender e minimizar a deformação permanente, trincas por fadiga e variação de temperatura. Pesquisas como a de Cominsky et al., (1994) diz que esta metodologia tem como principal finalidade desenvolver uma mistura econômica de

ligante asfáltico e agregado que alcance um nível de desempenho compatível com as demandas de tráfego, ambiente e estrutura do pavimento. Esta metodologia consiste, basicamente, em estimar o teor de ligante asfáltico por meio da fixação do volume de vazios que é de 4%, conhecendo-se a granulometria, massa específica e absorção dos materiais disponíveis. Neste trabalho, entende-se o procedimento de dosagem como parte da metodologia, por isso, os resultados de caracterização de agregados para dosagem, assim como o procedimento serão apresentados como etapas metodológicas.

3.4 Propriedade físicas e mecânicas dos agregados

Todos os ensaios realizados nesta pesquisa, foram executados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.4.1 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram cedidos pela empresa Rocha Cavalcante com sede em Campina Grande-PB. Os agregados fornecidos para as misturas de concreto asfáltico foram: Brita #19, Brita#12.5, Pó de Pedra e Fíller (cal hidratada).

Os ensaios realizados para caracterização dos agregados estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ensaios de agregados e especificações

ENSAIOS	NORMA
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT - ME 083/98
Massa específica real dos agregados graúdos	DNIT - ME 081/98
Massa específica real dos agregados miúdos	DNIT - ME 084/95
Absorção	DNIT - ME 081/98
Abrasão “Los Angeles”	DNIT - ME 035/98
Índice de Forma	DNIT-ME 086/94
Angularidade	ASTM C 1252/17
Adesividade	DNIT-ME 078/94

3.4.2 Granulometria

De acordo com a norma ABNT 9935/2005, o termo agregado é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para produção de mistura asfáltica.

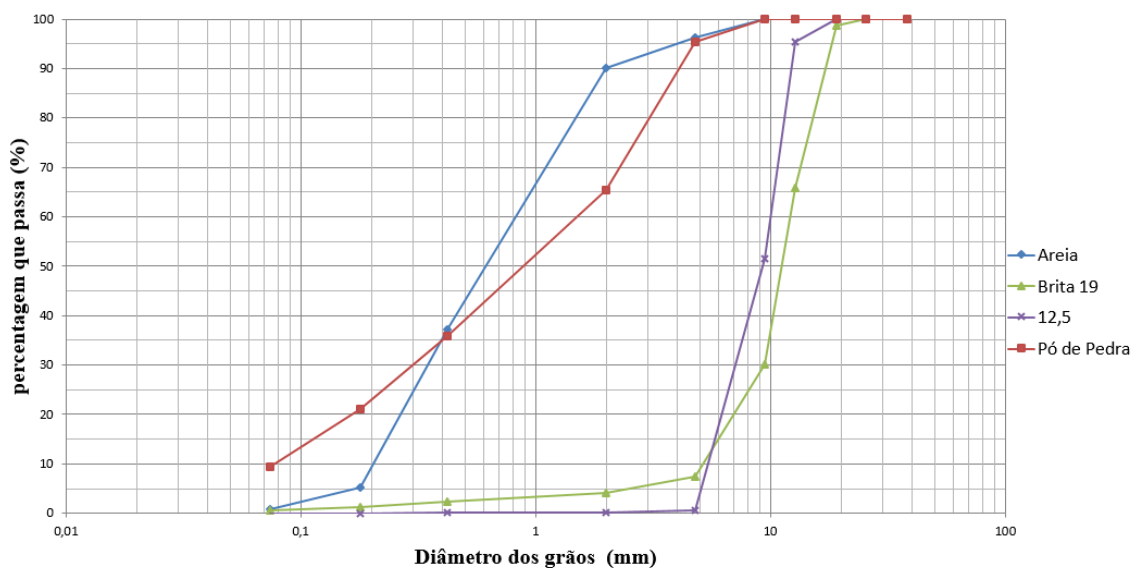
O ensaio de granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizado segundo a norma DNIT-ME 083/98, com peneiras de malhas de abertura 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm e 19,1mm. O material utilizado quando necessário deve ser colocado em estufa a 110 °C por 4 horas para a retirada da umidade antes do peneiramento ser realizado manualmente. Este ensaio é uma etapa importante e necessária para o processo de dosagem da mistura asfáltica, a distribuição granulométrica dos agregados influencia no comportamento dos revestimentos asfálticos.

A Tabela 7 e a Figura 9 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica por peneiramento (% retida)

Peneira (N)	Peneira (mm)	Brita 19mm (%)	Brita 12,5 mm (%)	Areia (%)	Pó de pedra (%)
1 ½'	38,1	-	-	-	-
1'	25,4	-	-	-	-
¾'	19,0	1,79	-	-	-
½'	12,7	52,46	-	-	-
3/8'	9,5	37,45	11,67	1,25	-
N° 4	4,76	7,93	79,53	3,25	0,43
N° 10	2,00	0,10	8,46	5,29	14,30
N° 40	0,42	0,03	0,09	61,20	41,72
N° 80	0,177	0,03	0,04	25,01	18,53
N° 200	0,074	0,05	0,09	3,33	14,09
Passante		0,15	0,13	0,67	10,94

Figura 9 - Curva granulométrica dos agregados



A curva de granulometria representa a distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos. Por meio da análise granulométrica é possível conhecer os agregados isoladamente, para assim poder compor a mistura ideal para o dimensionamento do pavimento. Observa-se que a curva granulométrica dos agregados (brita 12,5 e 19mm) possuem características de graduação uniforme. A areia apresentou características próximas ao pó de pedra por ter uma granulometria contínua e com baixa diversificação das partículas e as mesmas apresentarem uma graduação pequena.

3.4.3 Absorção e densidades dos agregados graúdos

A porosidade de um material é normalmente indicada pela quantidade de água que ele absorve quando imerso.

A absorção é uma relação entre a massa de água absorvida pelo agregado graúdo após 24 horas de imersão (DNER-ME 081/98) à temperatura ambiente e a massa inicial de material seco, sendo determinada para permitir o cálculo das massas específicas, real e aparente do agregado.

A expressão densidade, é de uso comum na engenharia, refere-se à massa específica. Segundo Pinto (2000), as relações entre quantidade de matéria (massa) e volume são denominadas massas específicas. No estudo dos agregados, são definidas três tipos de massa específica: real, aparente e a massa específica efetiva.

Massa específica real

A massa específica real, em g/cm³, é determinada por meio da relação entre massa seca e o volume real. O volume real então é constituído por o volume dos sólidos, desconsiderando o volume de quaisquer poros na superfície do agregado.

$$G_{sa} = \frac{\text{Massa seca}}{\text{Vol. real}} \quad (1)$$

Onde:

Vol. Real = volume da partícula sólida do agregado

Massa específica aparente

A massa específica aparente, em g/cm³, é determinada quando se considera o material como um todo (forma aparente), sem descontar os vazios. É calculada dividindo-se a massa seca pelo volume aparente do agregado (expressão 2).

$$G_{sb} = \frac{\text{Massa seca}}{\text{Vol. aparente}} \quad (2)$$

Onde:

Vol. Aparente = volume do sólido + volume do poro permeável à água.

Massa específica efetiva

A massa específica efetiva, em g/cm³. É determinada segundo Bernucci (2007), quando se trabalha com misturas asfálticas cujo teor de ligante asfáltico é conhecido. A mesma é calculada mediante da relação entre massa seca da amostra e o volume efetivo do agregado, conforme a expressão 4.

$$G_{se} = \frac{\text{Massa seca}}{\text{Vol. efetivo}} \quad (3)$$

O ensaio foi realizado seguindo a norma do DNIT – ME 081/98. Foram separadas amostras de 3.000g de brita 19mm e 2.000g de brita 12,5mm sendo, em ambas, desprezado todo o material passante na peneira 4,8mm por meio do peneiramento a seco. Cada amostra foi lavada sobre a peneira 4,8 para retirada de pó e impurezas e colocadas

em estufa a 110°C. Após ser resfriada à temperatura ambiente entre 1 e 2 horas, cada amostra foi colocada em imersão à temperatura ambiente por 24 horas.

Como preconizado a norma, após às 24 horas o material foi retirado e seco superficialmente para verificar a massa úmida. Em seguida colocado em um recipiente para verificação da massa submersa.

Logo após essa verificação, o material foi colocado novamente em estufa por mais 24 horas, resfriado à temperatura ambiente e verificada sua massa seca, para posteriormente obter a densidade aparente e a absorção dos agregados.

3.4.4 Densidade do Agregado Miúdo

O ensaio de massa específica do agregado miúdo foi realizado com a areia e o pó de pedra seguindo a norma NBR NM 52/2002, a qual determina a massa específica real e aparente.

3.4.5 Massa específica dos agregados graúdos e miúdos

A Tabela 8 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica dos agregados graúdos e miúdos.

Tabela 8 - Ensaio de massa específica com agregados graúdos e miúdos

Agregados	Massa Específica Real (g/cm³)	Massa Específica Aparente (g/cm³)
Brita 19mm	2,76	2,73
Brita 12,5mm	2,75	2,71
Pó de Pedra	2,49	2,48
Areia	2,40	2,37

A metodologia SUPERPAVE os dados de massa específica aparente e real são utilizados na determinação do teor de projeto de ligante asfáltico na dosagem SUPERPAVE.

3.4.6 Equivalente a areia

O ensaio de equivalente a areia, descrito na norma DNER-ME 054/97, define como sendo a relação volumétrica que corresponde à razão entre altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou agregado, numa condição estabelecida. O agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos, suas partículas individuais devem ser resistentes, livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. Nesse ensaio, amostras de agregado, com tamanhos de partículas passantes na peneira 4,8mm, é colocada em uma proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído e mantida em repouso por vinte minutos. Em seguida o conjunto é agitado por trinta segundos e, após completar a proveta com a solução até o nível predeterminado, a mistura fica em repouso por mais vinte minutos. Após ser concluída essa etapa, é determinada a altura de material floculante em suspensão (h_1). Como apresentado e sugerido em norma, com o auxílio de um bastão padronizado introduzido na proveta, é determinada a altura de agregado depositado por sedimentação (h_2). Neste estudo o ensaio foi realizado para os agregados miúdos areia e pó de pedra(Figura).

O equivalente a areia (EA) é determinado pela expressão:

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (4)$$

Logo após a pesagem, o material foi retirado do picnômetro e levado para ser secado em estufa (105 ± 5) °C até que fique na consistência de sua massa. Assim, foi determinada a massa específica aparente do agregado miúdo. Este ensaio foi realizado para os agregados miúdos areia e pó de pedra.

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de equivalente a areia para os agregados areia e pó de pedra:

Tabela 9 - Ensaio de equivalente a areia dos agregados miúdos

Agregados	Equivalente a Areia (%)
Areia	62,963
Pó de Pedra	56,934

Diante dos resultados obtidos no ensaio de equivalente a areia é possível concluir que tanto o agregado areia como pó de pedra são bons agregados para serem utilizados na mistura asfáltica, segundo Bernucci, (2007) o equivalente a areia deve ser de pelo menos 55%.

3.4.7 Abrasão “Los Angeles”

Os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão, durante de execução de revestimento asfálticos. Estes desgastes nos agregados também ocorrem durante a ação do tráfego. Por essa razão eles devem apresentar habilidade para resistir a quebras, fragmentação e degradação.

O ensaio utilizado nesta pesquisa para medir a resistência à abrasão foi o abrasão Los Angeles. Neste ensaio, conforme norma DNER-ME 035/98, consiste em obter uma determinada quantidade de agregado, cinco a dez quilos, satisfazendo a granulometria do estudo, e submetê-los a choques e desgastes durante a rotação de um tambor metálico de 80 centímetro a uma velocidade de 30 a 33 rpm. O efeito das rotações é intensificado pela presença de bolas de aço que podem ser de 500 ou 1000 rotações a depender da faixa granulométrica, no caso desta pesquisa foram utilizadas onze bolas de aço e o ensaio foi concluído após 500 rotações. Após o material ser submetido às rotações, foi peneirado e o desgaste foi aferido pela razão entre a quantidade de material que passou na peneira de 1,7mm após o ensaio e a quantidade total colocada inicialmente no tambor.

Abrasão “Los Angeles” do Agregado é calculada pela fórmula seguinte:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (5)$$

A_n = Abrasão “Los Angeles” da graduação n, com aproximação de 1%;

n = Graduação (A, B, C, D, E, F, G) escolhida para ensaio;

m_n = Massa total da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm).

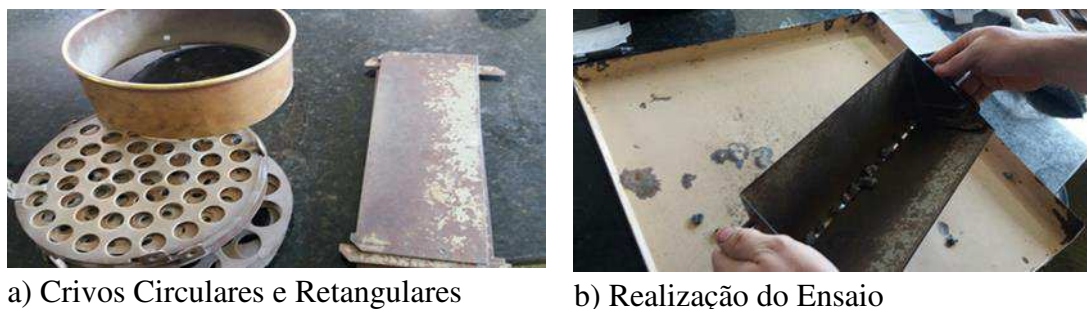
O agregado de Diâmetro Nominal Máximo de 19 mm apresentou 23,2% como resultado do ensaio de Abrasão “Los Angeles”, enquadrando-se no que é sugerido pela Norma brasileira (ME 035/98 do DNIT), que deve ser menor que 40%, para os serviços de pavimentação, apto para utilização em misturas asfálticas.

3.4.8 Forma das partículas

A forma das partículas influencia diretamente na resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e também a trabalhabilidade, muda também a energia de compactação necessária para se alcançar a densidade desejada (BERNUCCI, 2007). As partículas que possuem uma forma irregular ou de forma angular, tendem a apresentar um melhor intertravamento entre os grãos compactados, esse arranjo será maior quanto mais cúbicas forem as partículas e mais alongadas forem suas arestas. Para a pavimentação há uma preferência por agregados que possuam forma cúbica pois estas matérias tendem a sofrer menos fracionamento ao serem submetidas aos esforços causados por cargas aplicadas ao pavimento durante a compactação ou até mesmo durante os esforços causados pelo tráfego rodoviário.

O ensaio que caracteriza a forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f), descrito no ensaio preconizado pela norma DNER-ME 086/94. Esse índice de forma varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de boa cubicidade quando $f = 1,0$ e lamelar quando $f = 0,0$. Neste ensaio é definido a forma do agregado fixando o modo da determinação da variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado. Foram utilizadas peneiras com aberturas circulares e peneiras retangulares com aberturas determinadas de acordo com a faixa granulométrica. Uma análise granulométrica foi feita para saber em qual das faixas granulométricas os agregados se enquadravam. Escolhida a graduação, foram selecionadas as frações de agregado, usando as peneiras com crivos circulares, como indicado na norma. Em seguida as graduações foram peneiradas no crivos retangulares (Figura 10). Para cada fração que compõe a graduação foi determinado a relação ao seu peso inicial, as percentagens retidas em cada crivo redutor. As faixas que se enquadraram os agregados nesta pesquisa foram as faixas C e D.

Figura 10 - Ensaio para determinação da forma das partículas



O índice de forma foi calculado utilizando a fórmula abaixo:

$$f = \frac{P_1 + 0,5P_2}{100n} \quad (6)$$

Onde:

f = Índice de Forma;

P_1 = Soma das percentagens retidas nos crivos I, de todas as frações que compõem a graduação;

P_2 = Soma das percentagens retidas nos crivos II, de todas as frações que compõem a graduação;

n = Número de frações (ou de tamanhos diretrizes) que compõem a fração escolhida.

Neste ensaio foi obtido o índice de forma para a brita #12,5 de 0,72 e um índice de forma para a brita #19 de 0,78 logo os agregados apresentam uma boa aceitação quanto à forma para serem usados na mistura asfáltica.

3.4.9 Angularidade dos agregados graúdos e miúdos

A angularidade do agregado graúdo e miúdo garantem o atrito entre as partículas que propicia a resistência à deformação permanente (BERNNUCI, 2007). A angularidade do agregado graúdo é definida como sendo a porcentagem em peso de agregado maiores do que 4,75mm com uma ou mais faces fraturadas, já a angularidade do agregado miúdo

é definida como sendo a porcentagem de vazios de ar presentes em agregados com tamanhos de partículas menores de 2,36mm, em uma condição de estado solto.

O ensaio de angularidade dos agregados miúdos é determinado segundo o método ASTM C 1252. A equação utilizada para o cálculo da angularidade do agregado miúdo segundo o método da ASTM é:

$$\text{Angularidade} = \frac{V-W/G_{sb}}{V} \times 100\% \quad (7)$$

Onde

V = volume do cilindro;

W = massa de agregado miúdo; G_{sb} = massa específica real do agregado.

Os resultados apresentados na Tabela 10 foi satisfatório, atendendo os requisitos para tráfego médio e alto.

Tabela 10 - Ensaio de angularidade do agregado miúdo

Ensaio	Requisito	Agregado Miúdo Pó de Pedra
Angularidade	Volume de Tráfego Médio → ≥ 40%	46,27%
	Volume de Tráfego alto → ≥ 46%	

3.4.10 Adesividade do ligante betuminoso

A propriedade de aderência entre o agregado graúdo e o asfalto foi avaliado por meio do ensaio de adesividade, seguindo a norma do DNIT- ME 078/94, quanto ao deslocamento da película de asfalto que envolve a partícula de asfalto que envolve a partícula do agregado, quando a mistura é submetida à ação da água, por 72 horas à uma temperatura de 40°C.

A Figura 11 apresenta o resultado do ensaio de adesividade da fração graúda para o ligante puro 50/70.

Figura 11 - Etapa da avaliação visual do ensaio de adesividade



Fonte: Autora (2018)

De acordo com os resultados obtidos, foi observado que a fração graúda da mistura apresenta má adesividade ao CAP 50/70, uma vez que há deslocamento da película de asfalto após a as 72 horas da mistura imersa em água destilada a 40°C.

Para as amostras de ligante 55/75 e ligante convencional (50/70) modificadas por polímeros (S74 e SX500) e ácido polifosfórico os resultados obtidos foram satisfatório, ou seja, não houve deslocamento da película de asfalto modificado de todas as amostras ensaiadas, do agregado após o condicionamento.

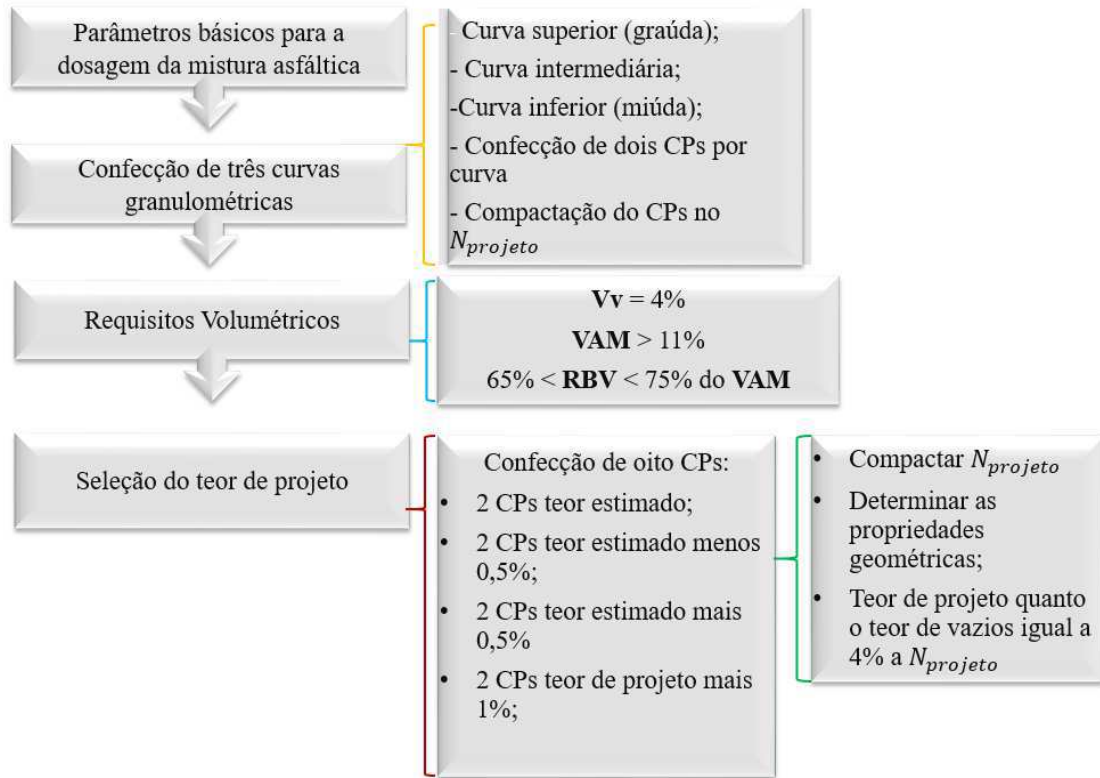
É possível verificar que o ligante puro 50/70 que não obteve resultado satisfatório no ensaio de adesividade ao ser modificado por teores de Polimul S74, Polimul SX500 e ácido polifosfórico, conferiu uma melhora na adesividade, diminuindo a influência da umidade entre o ligante betuminoso e o agregado graúdo. Houve melhoramento da adesividade do ligante convencional (50/70) mesmo sem a utilização de filler.

3.5 Procedimento de dosagem

Os procedimentos para a dosagem Superpave empregado nesta pesquisa, está apresentado no fluxograma da Figura 12. Foram realizados cinco dosagens: uma para o ligante 50/70, outra para o ligante 55/75, e para os três ligantes modificados com Polimul S74, PolimulSX e PPA. A primeira fase na dosagem Superpave é com a escolha de três composições granulométricas, feitas com agregados disponíveis (Brita 19mm, Brita 12,5mm, Areia, Pó de Pedra e Filler). As composições escolhidas foram uma superior

(ou graúda), uma intermediária e uma inferior (ou miúda), todas dentro da faixa C de granulometria do DNIT, incluindo a elas os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de restrição, como indicado pelo método de dosagem escolhido.

Figura 12 - Fluxograma do processo de dosagem SUPERPAVE



Fonte: Adaptação (BERNUCCI, 2007)

A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório, segundo a norma ASTM D 6925-09 (Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor).

Após o ensaio de granulometria de todos os possíveis agregados a serem utilizados na mistura asfáltica, foram feitas as curvas (Figuras 13, 14 e 15), seguindo a metodologia SUPERPAVE, onde o mesmo atribui a curva Fuller muito utilizada em outras metodologias de dosagem, a zona de restrição e pontos de controle. O diâmetro nominal das curvas granulométricas é de 19 mm. Nas Figuras 13, 14 e 15 são apresentadas as curvas superior, intermediária e inferior e a tabela 11 as devidas proporções dos agregados utilizados em cada uma das curvas.

Tabela 11 - Proporções dos agregados nas granulometrias

Curva	Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó-de-Pedra
Superior	14%	32%	19%	37%
Intermediária	13%	39%	25%	23%
Inferior	25%	30%	0%	45%

Figura 13 - Curva granulométrica superior

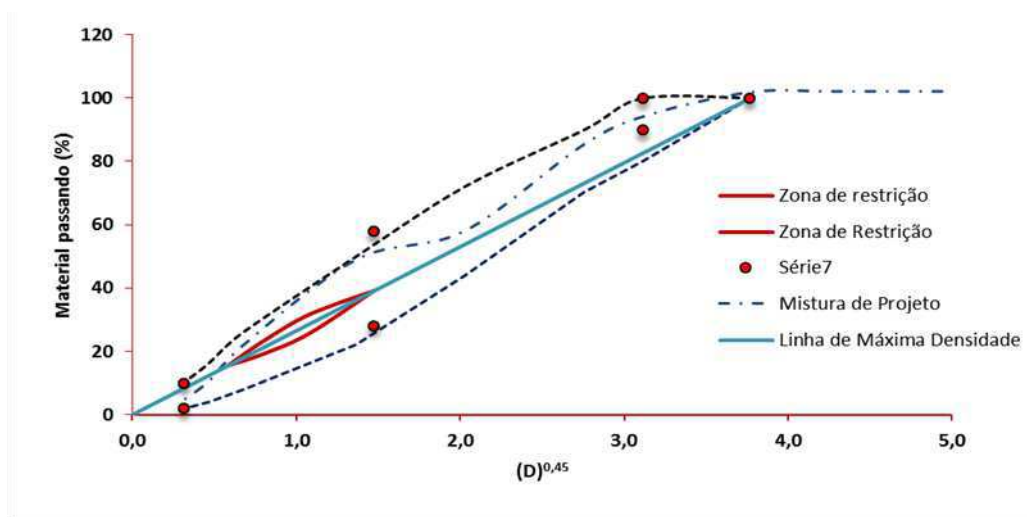


Figura 14 - Curva granulométrica intermediária

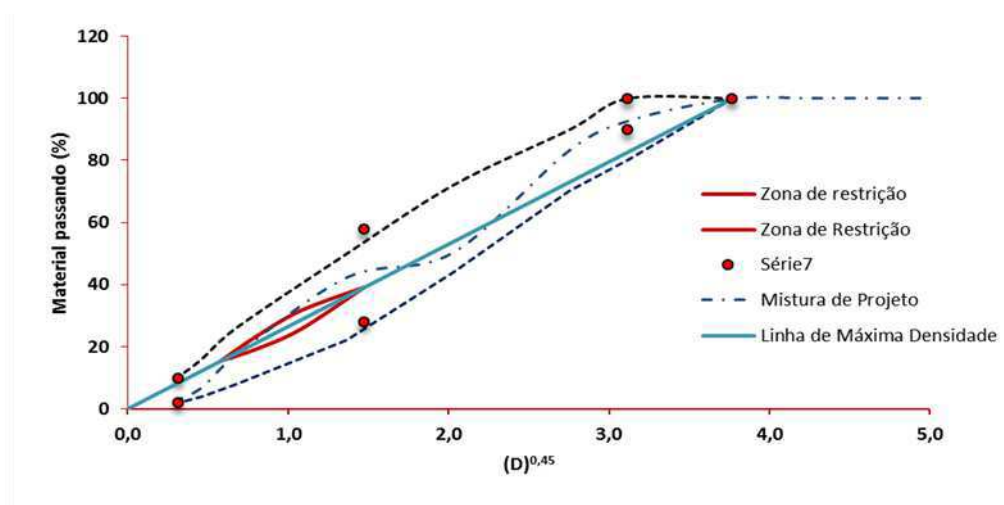
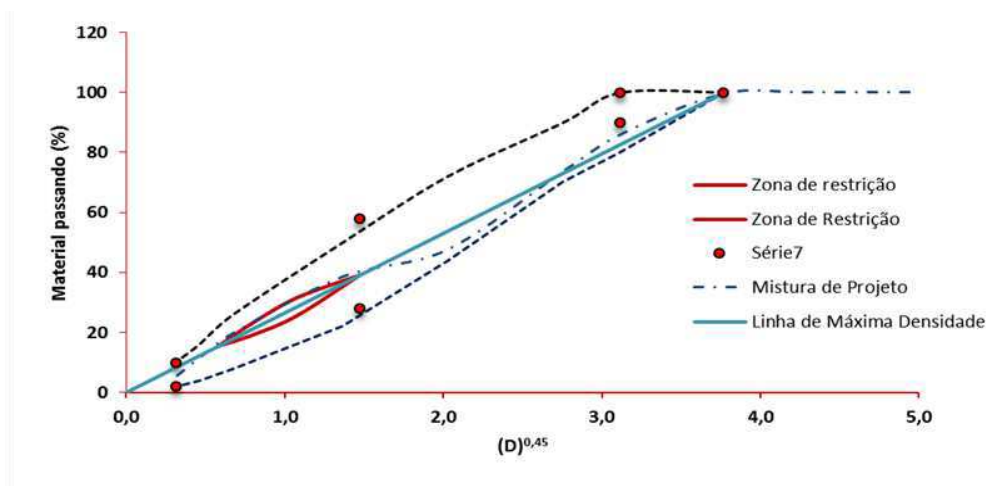


Figura 15 - Curva granulométrica inferior



No método de dosagem Superpave a quantidade de ligante na mistura asfáltica deve ser tal que a mesma atinja 4% de vazios no número de giros de projeto. Caso esse volume não seja atingido nas misturas experimentais feitas inicialmente, é realizada uma estimativa do teor de ligante que deve atender à exigência estabelecida pelo método.

A curva de projeto escolhida foi a curva inferior, pois foi a que mais se aproximou dos parâmetros exigidos pela metodologia superpave.

3.5.1 Compactação dos corpos de prova

A dosagem Superpave foi realizada a partir da norma ASTM D 6925-08 (Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor).

Para determinar o volume de vazios da amostra, é preciso realizar o cálculo da densidade máxima teórica da mistura ou DMT e também da densidade aparente do corpo-de-prova compactado. Segundo Bernucci (2007), a densidade máxima é utilizada nos cálculos de volume de vazios, absorção de ligante pelos agregados, massa específica efetiva do agregado e teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica. Este parâmetro pode ser calculado por intermédio de uma ponderação das densidades reais dos materiais constituintes, método teórico definido pela NBR 12891 (ABNT, 1993) ou determinado em laboratório utilizando uma bomba de vácuo, método Rice apresentado na norma americana ASTM D 2041 (American Society for Testing and Materials - ASTM, 2000). Nesta pesquisa foi utilizado o método do rice test.

3.5.1.1 Método Rice Test

No método Rice, a densidade máxima é obtida pela razão entre o peso ao ar de um volume de mistura asfáltica não compactada a uma temperatura fixa e o peso de um volume igual de água destilada livre de ar a uma temperatura também fixa (MARQUES, 2014).

Este tipo de ensaio é realizado a temperatura ambiente. Segundo Bernucci (2007), a vantagem do método Rice seria a obter a massa específica da mistura sem ter a necessidade de se obter as massas específicas dos seus constituintes separadamente, além de já considerar a absorção de ligante pelos agregados.

A DMM que significa massa máxima medida, é expressa pela relação entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto. É utilizada a terminologia Gmm para o parâmetro de massa máxima medida, sendo a Gmm também chamada de densidade específica Rice, parâmetro esse que pode ser determinado em laboratório seguindo as normas ASTM 2041 (2000) ou a AASHTO T 209 (1999).

A figura 16 mostra o equipamento para determinação do Gmm pelo método Rice Test.

Figura 16 - Equipamento para ensaio de determinação do Gmm (Rice Test – LEP/UFCG)



Fonte: Autora (2018)

Neste estudo está sendo considerado um tráfego de médio a alto, portanto a compactação das misturas foram feitas da seguinte forma:

a) dois corpos de prova foram compactados com Ni igual a oito giros, servindo como parâmetro para medir a compatibilidade da mistura, pois misturas compactadas rapidamente normalmente são instáveis quando são solicitadas pelo tráfego;

b) dois corpos de prova foram compactados com Ni igual a 100 giros, esse número de giros refere-se ao número de giros de projeto, sabendo que a densidade deve ser igual a apresentada em campo e deve-se obter 4% de volume de vazios, este foi o número de giros de projeto para esta pesquisa;

c) Mais dois corpos de prova foram compactados com o Ni igual a 160 giros, onde este é o número máximo de rotações necessárias para produzir uma mistura com uma densidade que não deve ser atingida em campo, pois nessa mistura o volume de vazios deve ser de pelo menos 2%. A compactação foi realizada com CGS com pressão de 600KPa e o ângulo de rotação de 1,25C°, conforme a metodologia Superpave. A mistura, ainda não compactada, permaneceu em estufa por um período de 2 horas antes da compactação de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem.

Foram então moldados dezoito corpos de prova para o teor inicial de ligante, onde seis corpos de prova separados para verificar o volume de vazios para cada curva granulométrica, divididos em dois corpos de prova para o número de giros de 8, 100 e 160 giros. Foram avaliados além do volume de vazios os critérios como %VAM (Volume de Agregado Mineral) que deve ser de 13,0 no mínimo, e Gmb corrigido conforme a Tabela 12.

A %VAM pode ser calculado conforme a equação abaixo:

$$VAM = 100 - \frac{\%G_{mm}@N_{projeto} \times G_{mm} \times P_{ag}}{G_{sb}} \quad (8)$$

Tabela 12 - Gmb corrigidos e critérios

Gmb corrigido, %Gmm	Ccritério
%Gmm @ Ninicial	< 89
%Gmm @ Nprojeto	96
Gmm @ Nmáximo	< 98

Não sendo encontrado o volume de vazios de 4% com este teor inicial, faz-se uma estimativa do teor de ligante que alcançaria os 4% de Vv com a equação abaixo:

$$P_{l,estimado} = P_{li} - [0,4 \times (4 - V_v)] \quad (9)$$

O novo teor de ligante então é calculado, é considerado mais três teores, além do teor estimado da seguinte forma: o teor estimado $\pm 0,5$ e $+1\%$ são moldados com o número de giros de projeto e medidos seu volume de vazios. O teor que atingir 4% de Vv é então o teor de projeto. Se após esta etapa o Vv ainda não for encontrado, utiliza-se dos teores encontrados $\pm 0,5$ e $+1\%$ e seus respectivos volumes de vazios e é elaborado uma curva teor de ligante em função do Vv, onde será possível estimar um novo teor que atenda ao critério de 4%, e então, determina-se o teor de projeto.

Para a compactação dos corpos de prova, foi necessária a determinação das temperaturas de usinagem e compactação da mistura. Realizada a caracterização do CAP puro e dos outros quatro ligantes modificados, a partir do ensaio de viscosidade rotacional do tipo Brookfield, conseguiu-se determinar tais temperaturas.

Segundo Bernucci (2007), a temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF ou $0,17 \pm 0,02$ Pa.s se medida com viscosímetro rotacional. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107 °C nem superior a 177 °C. A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15 °C acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar 177 °C.

Além destes limites tradicionais, outras relações são utilizadas para se estimar as temperaturas de usinagem e de compactação de ligantes asfálticos modificados. No caso do ligante asfalto modificado por polímeros, por exemplo, a Especificação de Serviço 385/1999 do DNIT menciona que a temperatura conveniente para aquecimento do material é de 150°C acrescida 3 °C para cada 1% de estireno-butadieno-estireno (SBS) até o limite máximo de 180 °C, com a temperatura recomendável para a compactação sendo 140 °C acrescida de 3 °C para cada 1% de SBS.

3.5.1.2 Teores estimados para os ligante estudados

O teor estimado de ligante puro para atender às especificações SUPERPAVE a volume de vazios de 4% foi de 4,25% de ligante asfáltico em mistura, o mesmo foi feito com os ligantes modificados, todos trabalhando na faixa inferior de granulometria. O teor real de ligante foi calculado considerando outros dois teores, além do teor estimado: teor estimado + 0,5% + 1% de onde foram moldados mais seis corpos de prova para cada teor e calculadas as propriedades volumétricas.

Após a compactação do Np, com os três teores testados para cada ligante não se atingiu o volume de vazios de 4%, desta forma foi estimado o teor de ligante com base na equação da reta de cada curva e assim encontrado os teores de 4,4% de ligante asfáltico convencional 50/70 (A), 4,65% de ligante modificado 55/75 (B), 4,65% de ligante asfáltico modificado com 1,8%S74+0,3%SX500+0,15%PPA (C), 4,87% de ligante asfáltico modificado com 1,8S74+0,3SX500+0,3%PPA (D) e 5% de ligante asfáltico modificado por 1,8%S74+0,3%SX500+0,5%PPA (E), para dosagem de corpos de prova. Na Tabela 13 estão destacados os valores de Vv, VAM e RBV, critérios de aceitação da dosagem SUPERPAVE.

Tabela 13 - Critérios da dosagem SUPERPAVE

Parâmetros	A	B	C	D	E
Vv	4,12	4,12	3,99	4,2	4,1
VAM	14,48	14,48	14,44	14,77	13,96
RBV	72,32	72,33	72,29	72,82	71,31

Como pode ser observado, todos os ligantes modificados apresentaram maiores teores de ligante em relação ao ligante puro. Gama (2016) observou o mesmo comportamento com amostra de ligante modificado por polímeros e ácido polifosfórico. Este aumento do teor de ligante nas misturas modificadas é explicado pela maior viscosidade dos mesmos, que permite incorporar teores de ligante mais elevado a mistura asfáltica sem risco de ocorrer exsudação nem deformação permanente. O incremento de ligante, aumenta a película de ligante que envolve os agregados, conferindo a mistura

asfáltica um aumento da durabilidade e resistência ao envelhecimento da camada de revestimento.

3.6 Ensaios mecânicos de concreto asfáltico

Realizado o procedimento de dosagem do teor ótimo de ligante asfáltico para os ligantes asfálticos puro e modificados por meio da metodologia Superpave, foram produzidos corpos de prova e suas propriedades mecânicas foram mensuradas a partir dos ensaios descritos a seguir.

3.6.1 Resistência a tração indireta por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral, também denominado de Brazilian Test foi proposto pelo prof. Luís Fernando Lobo Carneiro, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, é o ensaio de laboratório para a determinação de propriedades das misturas asfálticas mais executado no Brasil. Este ensaio, permite simular um plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação da carga, e tem por objetivo principal determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas. A norma que regulamenta o ensaio é a ME 138/94 do DNIT. Para a realização do ensaio foram moldados corpos de prova no compactador giratório SUPERPAVE com teores de CAP obtidos seguindo a metodologia SUPERPAVE. Este ensaio foi realizado para os cinco ligantes estudados nesta pesquisa. A Figura 17 mostra o corpo de prova sendo rompido na prensa para aferir a resistência a tração.

Figura 17 - Prensa do ensaio de resistência a tração



Fonte: Autora (2018)

3.6.2 Módulo de Resiliência

O ensaio de carga repetida ou módulo de resiliência serve para analisar o quanto os materiais que compõem as camadas do pavimento se deformam, é feita uma análise do comportamento tensão-deformação. Ponte *et al.*, (2014), diz que o módulo de resiliência é semelhante ao módulo de elasticidade, pois ambos são definidos pela teoria da elasticidade. Os dois módulos são representados pela razão entre tensão versus deformação. A diferenciação entre esses dois módulos são as ordens de grandezas de deslocamentos dos materiais utilizados em materiais elásticos comuns a engenharia e os materiais utilizados na pavimentação. Segundo Bernnuci, *et al.*, (2007), o MR em misturas asfálticas é realizado aplicando-se carga repetidamente no corpo-de-prova cilíndrico regular, esta carga gera uma tensão e então mede-se o deslocamento recuperável do corpo de prova no plano horizontal, numa dada temperatura.

O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi realizado seguindo as normas brasileiras e americanas respectivamente NBR 16018 e ASTM D4123. A obtenção dos deslocamentos resilientes no tempo de descarregamento, é a principal diferença entre as duas normas.

Foram realizados ensaios de MR a temperatura 25°C utilizando carga de 10% RT. A principal diferença entre as duas normas está na obtenção dos deslocamentos resilientes do tempo de descarregamento. A norma brasileira calcula o deslocamentos resiliente instantâneo e a norma americana calcula o deslocamento resiliente total. Os resultados de módulo instantâneo foram obtidos, utilizando a prensa UTM-25 (Figura 18), com a ajuda do software UTS0031.39. Foram utilizados 50 ciclos de condicionamento. A deformação elástica do corpo de prova durante o carregamento cíclico foi medido através dos LVDTs (Linear Variable Differential Transducer) com frequência de 1Hz, onde uma pequena parte do tempo foi utilizado para aplicação de carregamento e uma outra parte do tempo é utilizado para descanso.

O resultado do ensaio é uma média dos valores obtidos após os ciclos de condicionamento a que o corpo de prova foi submetido. A principal diferença entre MR e MD está na aplicação do carregamento, o ensaio de módulo dinâmico (módulo complexo) usa aplicação de carregamento senoidal, enquanto que o ensaio de módulo de resiliência usa carregamentos reversíveis com períodos de descanso.

Figura 18 - Ensaio módulo de resiliência



Fonte: Autora (2018)

O cálculo do Deslocamento total consiste em medir o valor obtido através da média dos valores de deslocamento no período entre 85% e 95% do período de descanso, pelo pico de deslocamento. A próxima etapa de análise é calcular o módulo de resiliência do material considerando o deslocamento instantâneo e é possível calcular também o módulo com base no deslocamento total. Quanto mais próximos forem os dois módulos, instantâneos e total, mais rápida é a recuperação elástica do material quando submetido à ação de cargas (BERNUCCI *et al.*, 2007). Em vias com volume de tráfego pesado, é importante que esses dois valores sejam o mais próximos possível.

De posse destes dados foi analisado a recuperação retardada (RR), que ocorre no período de descarregamento da aplicação da carga. Este parâmetro é de forma indireta relacionado com a viscoelasticidade do material; sendo possível verificar alterações de comportamento das misturas asfálticas quanto à forma de resposta resiliente e observar se o aumento do valor MR implica em misturas mais elásticas ou mais viscosas (ANITELLI, 2013).

A recuperação retardada é obtida a partir da Equação 10:

$$RR = \left(\frac{MR_I - MR_T}{MR_I} \right) \times 100 \quad (10)$$

Onde

RR = recuperação retardada, em %

MR_I = módulo instantâneo (NBR), em (MPa);

MR_T = módulo total (ASTM), em (MPa).

3.6.3 Módulo Dinâmico

SO ensaio de módulo dinâmico oferece estimativa da rigidez da mistura asfáltica. A principal diferença entre MR e MD está na aplicação do carregamento, o ensaio de módulo dinâmico usa aplicação de carregamento senoidal utilizando as parcelas elásticas e não elásticas das deformações, enquanto que o ensaio de módulo de resiliência usa carregamentos reversíveis com períodos de descanso utilizando apenas a parcela elástica no cálculo do módulo. As características elásticas e as propriedades viscoelásticas podem ser obtidas mediante o ensaio MD.

Segundo a AASHTO TP 62-07 (2009) neste método uma tensão de compressão senoidal é aplicada em um corpo de prova em dada temperatura e frequência de carga. A tensão aplicada e a deformação axial recuperável resultante da amostra é medida e usada para o cálculo do módulo dinâmico e do ângulo de fase.

Os resultados de módulo dinâmico foram obtidos seguindo a norma americana ASTM D 3479, nas temperaturas de 4°C, 21°C e 37°C, com frequências de carregamento para cada temperatura, de 0,1HZ; 0,5HZ; 1HZ; 5HZ; 10HZ e 25HZ. Foi obedecido a recomendação da AMPT que sugeriu devido a capacidade do equipamento, eliminar a maior e a menor temperatura (-10°C e 54°C) indicadas pela AASHTO TP-621(2009) para realização do ensaio. Neste ensaio devem ser usadas duas ou mais réplicas, nesta pesquisa foram utilizados três corpos de prova e retirada a média aritmética dos CPs obtidos. O ensaio MD pode ser utilizado para determinar as características elásticas e para determinar as propriedades viscoelásticas lineares do material. A Figura 19 ilustra o equipamento e a instrumentação do corpo-de-prova para o ensaio de módulo dinâmico.

Figura 19 - Ensaio de módulo dinâmico



Fonte: Autora (2018)

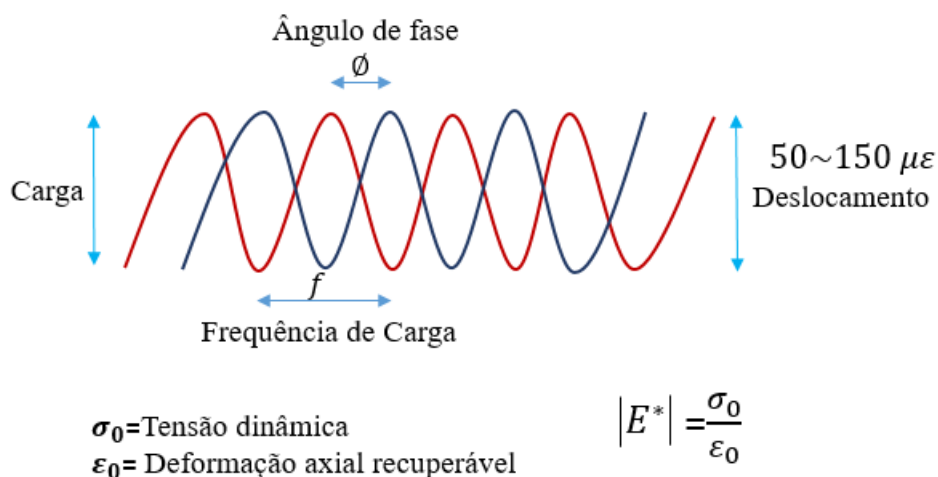
Os corpos de prova de 100 mm de diâmetro por 150 mm de altura, todos moldados seguindo a metodologia SUPERPAVE, foram individualmente equipados com LVDTs, foi testado para cada uma das 18 combinações de temperatura e frequência de carregamento, iniciando com a temperatura mais baixa até a temperatura mais alta. Para cada temperatura foi aplicada uma carga de contato diferente, igual a 5% de um valor típico de carga dinâmica normalmente verificado em cada temperatura, como mostrado na Tabela 14.

Tabela 14 - Nível de tensão referente a cada temperatura

Temperatura (°C)	Tensão (kPa)
4	700
21	350
37	140

As curvas mestras obtidas, são avaliadas de acordo com as inclinações das mesmas. Na Figura 20 é apresentado o procedimento utilizado para o cálculo do Módulo Dinâmico (MD).

Figura 20 - Explicação do cálculo do módulo dinâmico



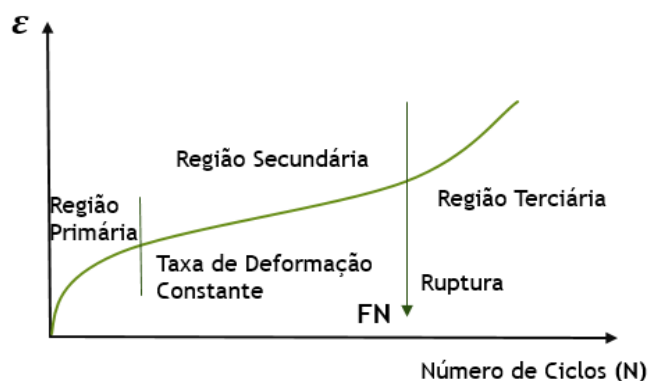
Fonte: (Adaptado, (AASHTO TP 62-07(2009))

3.6.4 Deformação Permanente

A deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica e o ensaio de deformação pelo critério diametral (*Flow Number*) é um teste de média, onde o mesmo é realizado sob o confinamento do corpo de prova, quando não é confinado é denominado de deformação permanente por carga repetida. Neste ensaio é feita a simulação de aplicação de cargas repetidas de veículos pesados sobre a estrutura do pavimento, onde será medido o parâmetro *Flow Number* (FN) que é o número de ciclos que o pavimento consegue suportar até que ocorra a fluência.

O resultado do ensaio é apresentado de forma gráfica que relaciona deformação permanente com o número de ciclos aplicados. A curva gerada pode ser subdividida em três zonas de deformação: a região primária, a região secundária e a região terciária, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN.



Fonte: Adaptado de Witczak et., al (2002)

Na região primária a densificação da amostra ensaiada ocorre a uma taxa elevada. Na região secundária a taxa de deformação é constante e na região terciária a deformação cresce exponencialmente, indicando um rompimento da amostra.

Segundo Costa (2017) a partir do ciclo referente ao FN a deformação ocorre a volume constante e a taxa de deformação volta a subir, pois a amostra não mais oferece resistência aos carregamentos.

O ensaio foi realizado na AMPT, com três corpos de prova para cada teor dosados segundo a metodologia SUPERPAVE com volume de vazios de 7 a 8%, aplicados ciclos de carga de 200KPa a uma temperatura de 60°C. O carregamento foi aplicado durante um período de 0,1s com repouso de 0,9s, até que fosse atingido um número máximo de 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 *microstrains*. Este ensaio não tem norma reguladora.

3.6.5 Dano por Umidade Induzida - Lottman

O ensaio seguiu como referência a norma americana AASHTO T283/2010 – Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture induced damage e norma brasileira ABNT NBR 15.617/2011 Misturas Asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. A norma preconiza que os CPs apresentem um volume de vazios de $7\% \pm 1\%$, eles são divididos em dois grupos o de referência ou de controle, e outro, o condicionado, após serem conhecidas as suas características volumétricas, para serem um dos grupos (condicionado) ser submetido à saturação parcial e condicionamento térmico.

O procedimento de condicionamento térmico da ASTM consiste em colocar o corpo de prova imerso em água sob pressão de 500 mmHg por cinco minutos, embalado em filme plástico e colocado em um saco plástico com 10 ml de água destilada e levado a um ciclo de congelamento de 18°C por 24 horas. Em seguida, os CPs foram submetidos a um banho 60°C por mais 24 horas. Após o condicionamento térmico os CPs têm a estabilização da sua temperatura em 25°C, posteriormente é levado à ruptura no ensaio de tração por compressão diametral. A relação de resistência à tração é obtida pela razão entre a média de RT do grupo condicionado e a do grupo de controle.

O ensaio do dano por umidade induzida (lottman) foi realizado para condicionamento de elevada severidade, sendo o valor RRT indicador da suscetibilidade da mistura ao dano por umidade, assim, para a na norma brasileira, esse valor é 75% e na AASHTO de 80%, nesta pesquisa será analisado conforme indicado a norma brasileira

3.6.6 Desgaste Cântabro

No Brasil este tipo de ensaio empírico de caracterização mecânica, vem sendo bastante difundido. O ensaio de desgaste cântabro, fornece informações não obtidas a partir dos ensaios mecânicos convencionais.

O ensaio de desgaste foi ensaiado seguindo a norma DNIT– ME 383/99, os procedimentos seguidos para a realização do ensaio foram: pesou-se inicialmente os CPs compactados seguindo a metodologia superpave; foi colocado os corpos de prova no aparelho de abrasão Los Angeles sem as esferas de aço, foram efetuadas 300 revoluções na velocidade angular de 30 rpm, em seguida foram pesados novamente os CPs. O desgaste Cântabro é então determinado por meio da expressão:

$$D = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

D= valor do desgaste em %;

M_1 = massa do corpo de prova antes do ensaio;

M_2 = massa do corpo de prova após o ensaio.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

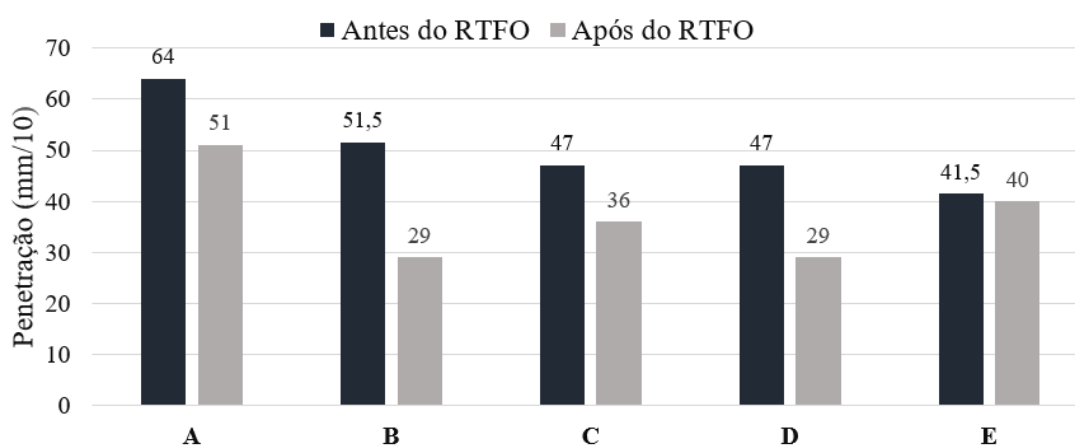
Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Neste encontram-se os resultados dos ensaios físicos e mecânicos do ligante convencional 50/70 (A), do ligante modificado 55/75 (B), e dos ligantes C, D e E modificados com incorporação Polimul S74®, Polimul SX-500® e Ácido Polifosfórico (PPA) este último em diferentes porcentagens, ensaios mecânicos das misturas asfálticas com os ligantes convencional (50/70), convencional modificado com polímeros e ácido polifosfórico e mistura asfáltica com o ligante 55/75. Com base nos resultados dos ensaios dos ligantes asfálticos e de acordo com a especificação n° 32 da ANP, os ligantes modificados foram classificados ou não como elastoméricos 60/85-E.

4.1 Ensaios Empíricos com os Ligantes Puro e modificados

4.1.1 Ensaio de Penetração

A Figura 22 apresenta dos resultados obtidos para os ensaios de penetração para os ligantes em estudo, antes e após RTFO.

Figura 22 - Ensaio de penetração à 25°C antes e após RTFO



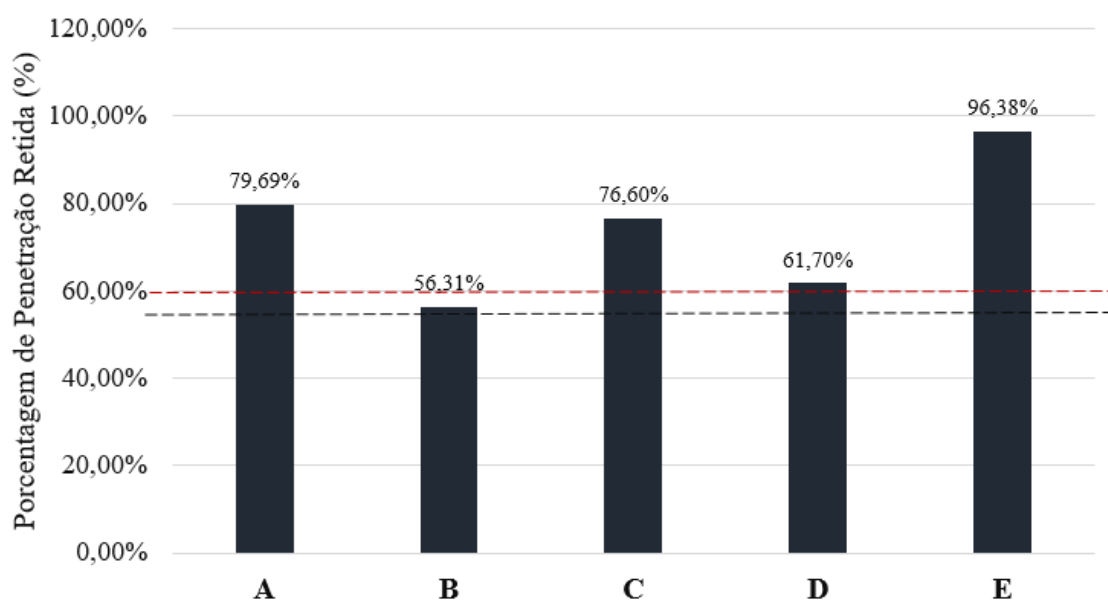
CAP 50/70	100%	-	97,75%	97,60%	97,40%
CAP 55/75	-	100%	-	-	-
Polímuls74	-	-	1,80%	1,80%	1,80%
PolímulsX500	-	-	0,30%	0,30%	0,30%
PPA106%	-	-	0,15%	0,30%	0,50%

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que o ligante modificado 55/75 (B), apresentou uma rigidez superior ao encontrado com o ligante puro 50/70 (A). Os ligantes modificados com S75, SX500 e PPA apresentaram valores de penetração menores que as amostras A e B. Com o aumento da adição dos teores de PPA ao ligante modificado com SX500 e S74, houve uma tendência de aumento da rigidez. De uma forma geral, observa-se que redução da penetração para as amostras de ligante modificado apresentaram novos valores aceitáveis conforme a ANP n° 32 para ligantes elastoméricos 60/85-E. Amostras modificadas apenas com PPA, apresentam redução nos valores de penetração pois o ácido polifosfórico é capaz de aumentar a rigidez deste ligante (Kodrat *et al.*, 2007). Ligante modificado com 0,3% de SX500, torna a amostra mais rígida devido a característica de polímero-termoplástico (GAMA *et al.*, 2016).

Topal (2010), observa que misturas asfálticas com alta penetração são mais resistentes a baixa temperatura de fissuramento bem como a deformação permanente. Sendo assim, os resultados obtidos indicam aumento da rigidez do ligante, o que pode indicar uma maior susceptibilidade à variação da temperatura, podendo apresentar um comportamento não satisfatório a baixas temperaturas.

O envelhecimento do material proporciona um aumento no enrijecimento que pode ser observado com a redução dos valores de penetração. Após o envelhecimento a curto prazo RTFO os ligantes puro e modificados, os resultados do ensaio foram expostos em termos de porcentagem retida (PPR), calculado pela razão entre a penetração antes e após envelhecimento a curto prazo. Na Figura 23 é apresentada a penetração retida dos ligantes asfálticos estudados.

Figura 23 - Porcentagem da penetração retida (PPR)



CAP 50/70	100%	-	97,75%	97,60%	97,40%
CAP 55/75	-	100%	-	-	-
Polímuls74	-	-	1,80%	0,30%	0,15%
PolímulsX500	-	-	1,80%	0,30%	0,30%
PPA106%	-	-	1,80%	0,30%	0,50%

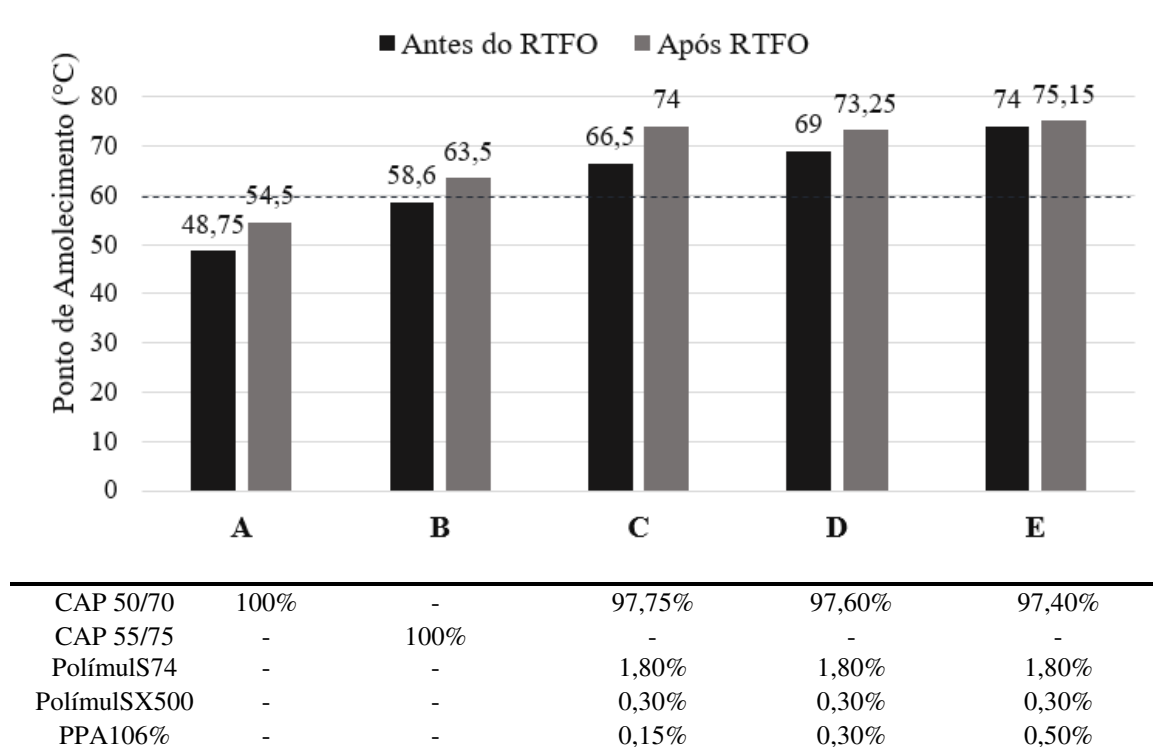
O PPR funciona como um indicador da sensibilidade do ligante ao envelhecimento a curto prazo. Menores valores de penetração retida são mais sensíveis ao envelhecimento.

Para as amostras de ligante estudadas, observa-se que a amostra A atende as especificações da norma DNIT 095/06 que estabelece que a penetração retida mínima para um ligante puro deve ser de 55%. Os ligantes modificados por polímero reativo (POLIMUL S74), mais polímero não-reativo (POLIMUL S-X500) e ácido polifosfórico (PPA116%) como catalizador, apresentaram resistentes ao processo de envelhecimento e se enquadraram nas especificações da ANP n°32 apresentando porcentagem de penetração retida acima do mínimo especificado para ligantes elastômeros 60/85-E que é de 60%. É possível observar nas amostras C, D e E que o aumento do teor de PPA116% no ligante já modificado pelos polímeros reativos e não reativos, proporciona maior resistência do ligante ao envelhecimento a curto prazo.

4.1.2 Ponto de Amolecimento

Os resultados das amostras ensaiadas antes e após envelhecimento a curto prazo (RTFO) estão apresentados na Figura 24.

Figura 24 - Ponto de amolecimento (PA) antes e após envelhecimento em RTFO, em °C.



Os ligantes modificados apresentaram aumento do ponto de amolecimento quando comparado com o ponto de amolecimento do ligante convencional (A), sendo por isso menos afetados pela temperatura, indicando também melhorias nas propriedades em elevadas temperaturas. O ponto de amolecimento aumentou com o aumento do teor de ácido polifosfórico nos ligantes modificados por polímeros (S74 e SX500) indicando aumento da rigidez dos ligantes.

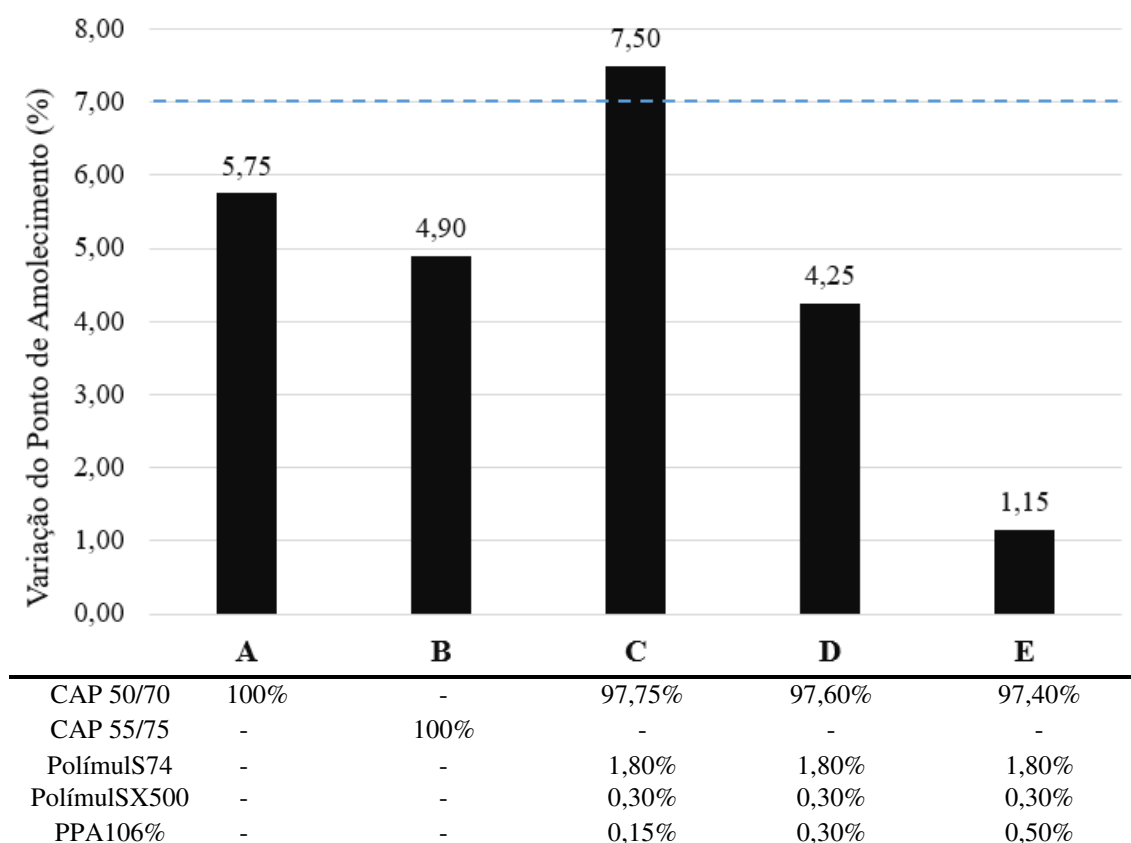
Diante destes resultados e segundo especificações da ANP todos os ligantes modificados podem ser classificados como elastoméricos 60/85-E com excessão dos ligante modificado B que apresentou ponto de amolecimento menor que o mínimo estabelecido que é 60°C. Segundo Pallaco et al., (2015) a adição do polímero não reativo SX500 aumenta a rigidez do ligante e tem como consequência disso o aumento da resistência a deformação.

O ponto de amolecimento das amostras dos ligantes puro e modificados foram estudadas após o envelhecimento a curto prazo RTFO, sendo possível observar que se tornaram-se mais rígidas. Segundo Gama (2016) amostras de ligante modificados com polímul S74; Polímul SX-500 e ácido polifosfórico em teores variados, o enrijecimento

ocorre devido à perda de componentes voláteis que ocorre durante o processo de envelhecimento e devido a reação química entre o polímul S74 e o ligante quando submetidos a temperaturas elevadas.

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para a variação do ponto de amolecimento antes e após RTFO. Segundo as especificações da ANP n° 32, os valores da variação PA devem ser menores que 7°C. Entre as amostras modificadas (C, D e E), observa-se que a amostra de ligante mais afetada pelo processo de envelhecimento a curto prazo no ponto de amolecimento (PA) foi a amostra tipo C, composta por 1,8%S74 mais 0,3%SX-500 e 0,15% PPA, visto que apresentou maior variação do ponto de amolecimento. O aumento do teor de PPA proporcionou uma diminuição gradativa na variação do PA. O ligante C ultrapassou o limite estabelecido, atingindo uma variação do ponto de amolecimento de 7,5°C antes e após RTFO.

Figura 25 - Variação do Ponto de Amolecimento



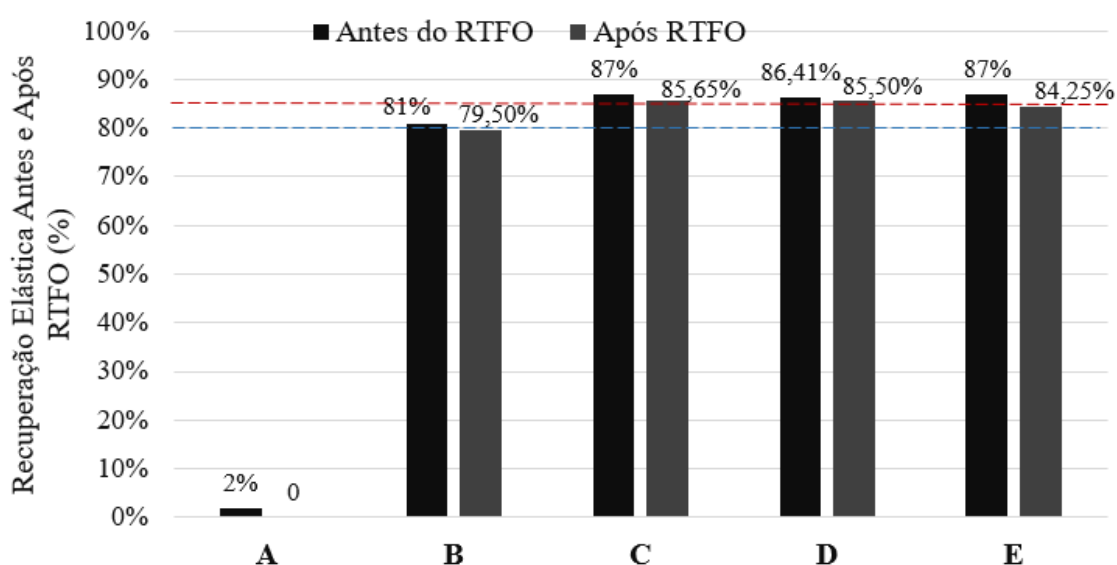
O ligante E composto por 1,8%S74 mais 0,3%SX-500 e 0,5 PPA foram os teores de ligantes modificados que apresentaram menor variação do ponto de amolecimento quando o mesmo foi exposto ao envelhecimento a curto prazo (RTFO). Diante deste resultado analisa-se que houve um ganho progressivo com o aumento do teor de PPA da

resistência quando analisado sob o aspecto PA na mistura com os polímeros reativos e não reativos.

4.1.3 Recuperação elástica

O ensaio de recuperação elástica foi realizado com todas as amostras, mas poderia ter sido realizado apenas com as amostras de ligantes modificados, pois como pode ser observado no resultado dos ensaios, ligantes puros como o ligante 50/70 (A), praticamente não apresentam recuperação elástica, pois se tratam de materiais que não possuem características elastoméricas. Na Figura 26 é apresentado o resultado da recuperação elástica de todos os ligantes estudados antes e após RTFO.

Figura 26 - Recuperação elástica dos ligantes puro e modificados



CAP 50/70	100%	-	97,75%	97,60%	97,40%
CAP 55/75	-	100%	-	-	-
PolímulS74	-	-	1,80%	1,80%	1,80%
PolímulSX500	-	-	0,30%	0,30%	0,30%
PPA106%	-	-	0,15%	0,30%	0,50%

Analisando os resultado do ensaio, confirma-se o que foi dito por Gama *et al.*, (2016), a adição do polímero não reativo SX500 às amostras modificadas com polímero reativo S74 e ácido polifosfórico, produz ligantes de maior elasticidade, uma vez que os termoplásticos aumentam a rigidez da amostra pela resistência a deformação. As amostras C, D e E apresentam uma recuperação elástica maior que as amostras A e B, formadas respectivamente por amostras de ligantes convencional (50/70) e ligante elastomérico

55/75 amplamente utilizado no mercado mundial. Observa-se que apenas os ligantes modificados C, D e E podem ser classificados segundo a ANP n°32 como ligantes elastoméricos 60/85, por apresentarem RE superior a 85%.

A caracterização de ligantes asfálticos elastoméricos pela ANP n° 32 se dá basicamente pela observação dos parâmetros ponto de amolecimento (PA) e recuperação elástica (RE). Diante de todos os resultados analisados é possível classificar os ligantes modificados C, D e E como ligantes elastoméricos 60/85-E.

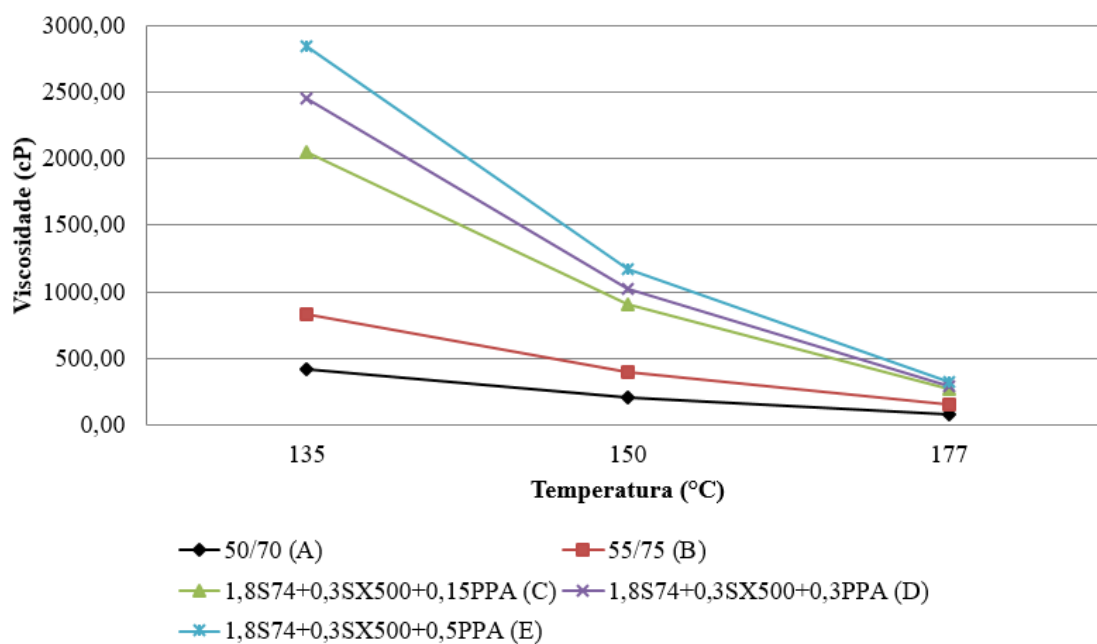
O limite mínimo estabelecido para ligantes modificados classificados como elastômeros segundo as especificações da ANP n° 32 é de 80% de RE após envelhecimento. É possível observar que os ligantes modificados C, D e E mantiveram a RE após submetido um envelhecimento a curto prazo RTFO. O ligante B manteve RE após o envelhecimento, comportamentos similares foram observados por Bulatović *et al.*, (2014). Todos os ligantes modificados B, C, D e E atenderam as especificações da ANP n° 32 e podem ser classificados segundo a RE como polímeros elastômeros do tipo 60/85-E.

4.1.4 Viscosidade Rotacional

A medida da viscosidade do ligante asfáltico é importante na determinação da consistência apropriada para que o mesmo apresente uma perfeita cobertura dos agregados quando feita a mistura e também a consistência adequada para a aplicação em campo.

A Figura 27 apresenta as viscosidades rotacionais dos ligantes asfálticos 55/75 convencional (50/70), convencional modificado com polímero reativo, não reativo e ácido polifosfórico nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C.

Figura 27 - Viscosidade dos ligantes nas três temperaturas ensaiadas



Conforme resultados obtidos verifica-se aumento da viscosidade dos Ligantes modificados em todas as temperaturas ensaiadas. Observa-se o aumento do teor de ácido polifosfórico (PPA116%) ocasionou aumento da viscosidade do ligante convencional modificado por S74 e SX500, corroborando com o que foi dito por Yan *et al.*, (2013) e Gama *et al.*, (2016), os mesmos afirmam que o aumento do teor de PPA ocasiona ao aumento de alfatenos e diminuição de resinas em ligantes asfálticos, sabendo que os asfaltenos são responsáveis pelas propriedades reológicas dos ligantes, o que pode explicar o aumento da viscosidade em modificações com teores elevadas de ácido polifosfórico.

Segundo Polacco *et al* (2004), terpolímeros reativos quando misturados ao ligante asfáltico, possuem características de reação continuada, significando que quando submetido a elevada temperatura a reação química entre polímero e ligante continua e pode conduzir a um significativo aumento da viscosidade.

Todas as composições apresentaram resultados de acordo com os critérios da ANT n°32 para ligante elastomérico 60/85-E que são: 3000 cP para a temperatura de 135°C, 2000 cP para a temperatura de 150°C e 100cP para a temperatura de 177°C.

O ensaio de viscosidade rotacional é importante, para encontrar as temperatura as temperaturas de usinagem (TU) e compactação (TC), imprescindíveis no processo de misturas asfálticas do Superpave Asphalt Institute, 1995) a melhor viscosidade para a mistura permitindo que todos os agregados sejam totalmente envolvidos pelo ligante asfáltico. Na compactação a viscosidade deve ser tal que não ocorra escorregamento da mistura asfáltica pela ação dos rolos compactadores e o volume de vazios (Vv) seja o preconizado pela metodologia de dosagem, que na metodologia SUPERPAVE deve ser de Vv de 4%.

O método para determinação das temperaturas de usinagem e compactação utilizado nesta pesquisa foi o tradicional regido pela ASTM D 2493 que apesar de ter sido criado para misturas não modificadas, é amplamente utilizado. Segundo esta metodologia a temperatura apropriada para usinagem a que o ligante asfáltico apresenta viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e a temperatura de compactação a que apresenta viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. As temperaturas de usinagem (TU) e compactação (TC), são apresentadas na Tabela 28.

Figura 28 - Temperaturas de usinagem e compactação

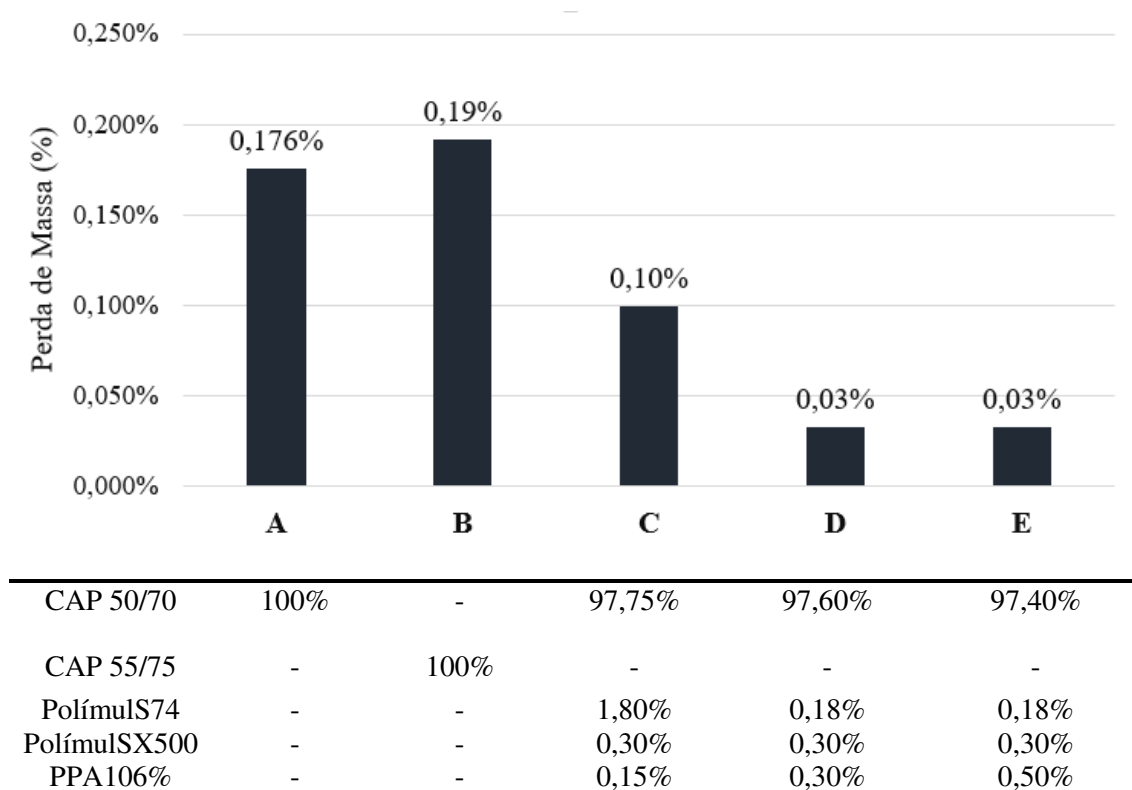
Ligante Asfáltico	Código	Usinagem (°C)		Compactação	
		Intervalo	Valor médio	Intervalo	Valor médio
CAP 50/70	A	143 - 140	142	158 - 150	154
CAP 55/75	B	160 - 155	158	177 - 170	174
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,15 PPA	C	192 - 185	188	178 - 174	176
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,3 PPA	D	191 - 183	187	180 - 175	178
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,5 PPA	E	195 - 190	192	184 - 172	181

O ligante puro (A) apresentou uma temperatura média de usinagem de 142°C e de 154°C de compactação. O ligante modificado 55/75 (B), apresentou as temperaturas médias de 158°C de usinagem e 174°C de compactação. Já os ligantes modificados com S74, SX500 e PPA apresentaram uma faixa de temperatura média de usinagem de 188°C a 192°C e de 176°C a 181°C de compactação. No entanto segundo o DNIT, é sugerido que essas temperaturas não excedam os 177°C, por questões de segurança, por essa razão todos os ligantes que excederam essa temperatura recomendada, foram substituídas pela temperatura máxima de 175°C para mistura e compactação.

4.1.5 Variação da massa após envelhecimento a curto prazo (RTFO)

Os resultados obtidos para os ligantes convencional (50/70), modificado 55/75 e convencional modificado por polímeros e ácido polifosfórico estão expostos na Figura 29 e mostra as perdas de massa (%) dos ligantes puro e modificados, após envelhecimento RTFO.

Figura 29 - Perda de massa dos ligantes convencional e Modificados



A norma do DNIT 095/2006 especifica que o limite da perda de massa deve ser de no máximo 0,5%. Neste estudo, todos os ligantes, puros e modificados encontram-se dentro da tolerância de envelhecimento não havendo perda da qualidade do ligante. Observa-se também que a modificação do ligante asfáltico levou a diminuição da perda de massa após o envelhecimento. Isto posto é possível afirmar que o uso dos modificadores aumentou a resistência do ligante ao envelhecimento pela diminuição de componentes voláteis.

Os resultados dos ensaios físicos e mecânicos dos ligantes estudados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Ensaio físicos e mecânicos dos ligantes asfálticos

Características	Ligante A	Ligante B	Ligante C	Ligante D	Ligante E	Unidade
Penetração	64	51,5	47,7	47	41,5	dmm
Ponto de Amolecimento	48,75	58,6	66,25	69	74	°C
Índice de Susceptibilidade Térmica	-0,929	0,827	2,42	2,51	2,989	n/a
Recuperação Elástica	2	81	89,11	86,41	87	%

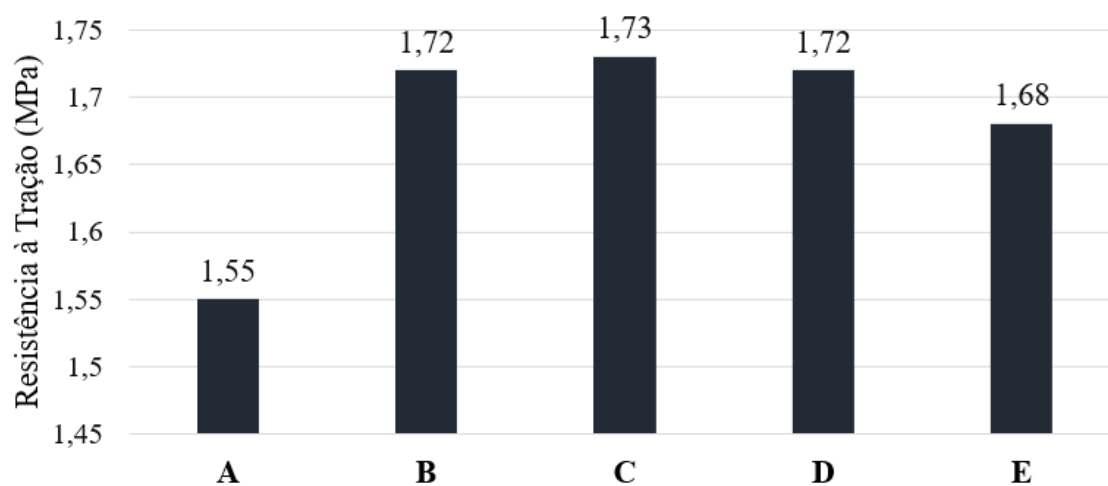
4.2 Ensaio mecânicos com ligantes puro e modificados

4.2.1 Resistência a Tração

O ensaio de tração por compressão diametral (RT) foi realizado como descrito do no item 3.6.1. Este ensaio como descrito anteriormente foi realizado segundo os procedimentos DNIT – ME 138/94. Para cada um dos ligantes estudados, foi determinado o resultado a partir da média de três amostras.

O limite mínimo para misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento, preconizado pela Norma do DNIT ES031/2006 a 25°C quando destinados a camada de rolamento deve ser de no mínimo 0,65MPa (a 25°C). Desta forma é possível observar conforme resultados apresentado na Figura 30 que as misturas em estudo atendem as solicitações da Norma do DNIT.

Figura 30 - Ensaio de resistência a tração



CAP 50/70	100%	-	97,75%	97,60%	97,40%
CAP 55/75	-	100%	-	-	-
PolímulS74	-	-	1,80%	1,80%	1,80%
PolímulSX500	-	-	0,30%	0,30%	0,30%
PPA106%	-	-	0,15%	0,30%	0,50%

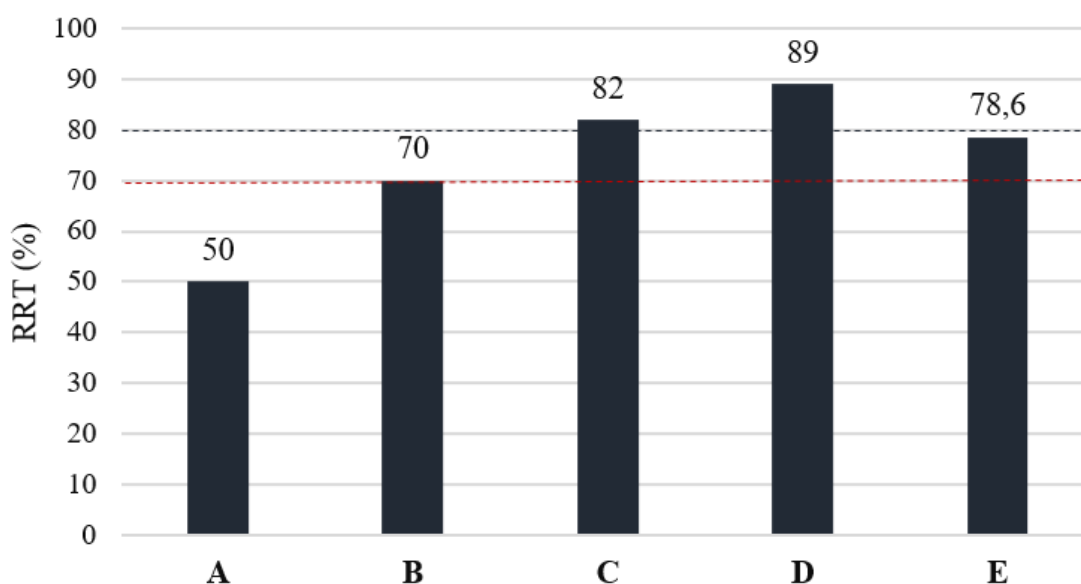
De acordo com os resultados apresentados na Figura 30, observa-se que as misturas asfálticas com ligantes modificados com PolímulS74; PolímulSX500 e PPA apresentaram em média maior resistência a tração se comparado com o ligante puro, isso significa maior resistência a ruptura e resistência a tração semelhante ao ligante modificado 55/75.

Gama (2016) realizou estudos sobre as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com o uso de 1,8%PolímulS74; 0,3%PolímulSX500 e 0,15%PPA. A pesquisadora encontrou resultados semelhantes com esta pesquisa, com uma resistência à tração permanecendo em torno de 1,46 MPa.

4.2.2 Lottman Modificado

Os resultados de RRT para as amostras de ligante com 7% de vazios estão apresentados na Figura 31.

Figura 31 - Resistência retida à tração



CAP 50/70	100%	-	97,75%	97,60%	97,40%
CAP 55/75	-	100%	-	-	-
PolímulS74	-	-	1,80%	1,80%	1,80%
PolímulSX500	-	-	0,30%	0,30%	0,30%
PPA106%	-	-	0,15%	0,30%	0,50%

A AASHTO T283/99, sugere para a metodologia SUPERPAVE o critério RRT 80%, enquanto que a MP 8-01 da AASHTO estabelece o limite mínimo para RRT de setenta por cento (70%). O ligante puro não atendeu aos critérios preconizados pela norma. Enquanto que todos os ligantes modificados B, C, D e E encontram-se dentro do limite de norma.

As misturas com os ligantes modificados apresentaram resultados superior ao mínimo exigido para um bom desempenho a camada de revestimento e a mistura com melhor desempenho ocorreu com 1,8 PolímulS74 + 0,3 PolímulSX + 0,3PPA como pode ser observado na Figura 38, não apresentou perda significativa de Resistência à Tração após o condicionamento. As misturas com o ligante puro caracterizam mais de 40% de perda de resistência quando submetidas ao condicionamento, confirmando assim o resultado do ensaio de adesividade onde todos os ligantes apresentaram bons resultados com exceção do ligante puro 50/70. Sendo assim é possível afirmar que as misturas com o ligante 50/70 possuem maior facilidade de apresentar dano por umidade e com isso é possível que problemas como desagregação dos agregados possam surgir nos pavimentos.

Agências americanas segundo MS-2 Asphalt Mix Design Methods (2014), utilizam o parâmetro de 70% mínimo baseadas em experiências, considerando que RRT menor que 60% são inaceitáveis, pois indicam alta sensibilidade ao dano por umidade. Com a modificação dos ligantes com os polímeros reativos, não reativos e o ácido polifosfórico, contribuíram para a melhoria da adesividade e manutenção de sua resistência mesmo após os ciclos de umidade, indicando maior resistência durante a vida útil do pavimento.

4.2.3 Desgaste Cântabro

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios da perda por desgaste à abrasão de todas as misturas ensaiadas. Como pode-se verificar, o desgaste à abrasão foi maior na amostra A, provavelmente por apresentar uma estrutura mais frágil, decorrente da pouca adesão e coesão do sistema agregado/ligante.

Tabela 16 - Ensaio desgaste cântabro

Amostra	A	B	C	D	E
Desgaste (%)	8,28	4,80	6,80	3,50	3,61

As misturas asfálticas que contêm o ligante modificado, apresentaram uma maior resistência a desagregação, e as amostras C, D e E melhoraram a resistência ao desgaste a medida que foi aumentando o teor de ácido polifosfórico. O resultado deste ensaio confirma os analisados nos ensaios de adesividade e lottman, onde o ligante puro não apresentou bons resultados e os modificados apresentaram excelentes respostas. Pavimentos asfálticos com menor desgaste cântabro terá como consequência uma maior resistência à abrasão e conseqüentemente terá uma vida de serviço maior.

4.2.4 Módulo de Resiliência

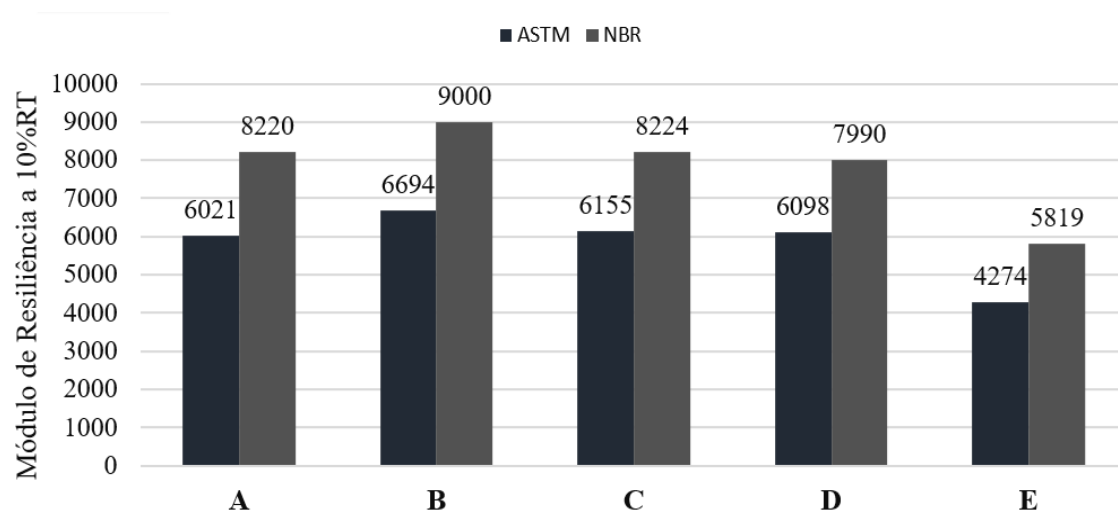
A Tabela 18 são apresentados os resultados, obtidos para todas as misturas estudadas com os ligantes puro e modificados.

Tabela 17 - Ensaio de Módulo de Resiliência

Amostra	A	B	C	D	E
ASTM (MPa)	6021	6694	6155	6098	4274
NBR (MPa)	8220	9000	8224	8364	5819

Com os resultados obtidos é possível observar na Tabela 18 e na Figura 32 que o módulo de resiliência das misturas com os ligantes modificados são próximas aos resultados obtidos na mistura com o ligante puro. Isso mostra que todos os ligantes apresentam basicamente a mesma rigidez quando submetidos a carregamentos leves a temperatura de 25°C.

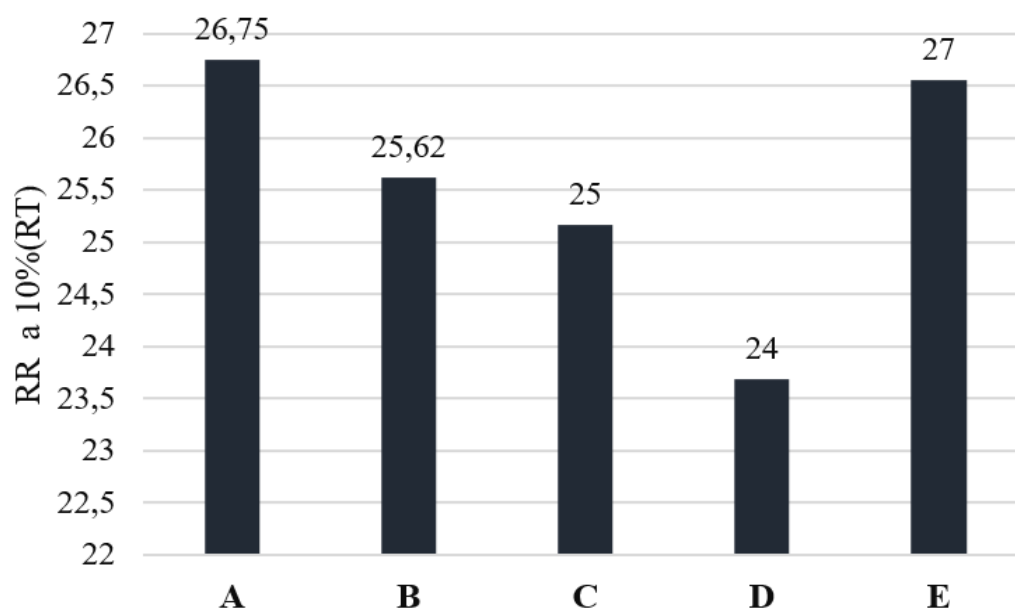
Figura 32 - Módulo de resiliência



CAP 50/70	100%	-	97,75%	97,60%	97,40%
CAP 55/75	-	100%	-	-	-
PolímulS74	-	-	1,80%	1,80%	1,80%
PolímulSX500	-	-	0,30%	0,30%	0,30%
PPA106%	-	-	0,15%	0,30%	0,50%

Na análise do MR_I e MR_T , a porcentagem de recuperação retardada (% RR) das amostras pode ser calculada. Este parâmetro refere-se a quantidade de deformação retardada, foi observada no módulo total em relação ao instantâneo. Os resultados de %RR a 10% da RT podem ser observados na Figura 33.

Figura 33 - Porcentagem de recuperação retardada a 10% RT



CAP 50/70	100%	-	97,75%	97,60%	97,40%
CAP 55/75	-	100%	-	-	-
PolímulS74	-	-	1,80%	0,30%	0,15%
PolímulSX500	-	-	1,80%	0,30%	0,30%
PPA106%	-	-	1,80%	0,30%	0,50%

Nesta condição estudada de 10% RT a 25°C é observado o mesmo retardo de recuperação elástica para todas as composições, a mistura D apresentou um retardo de aproximadamente 11% a menos que as demais misturas.

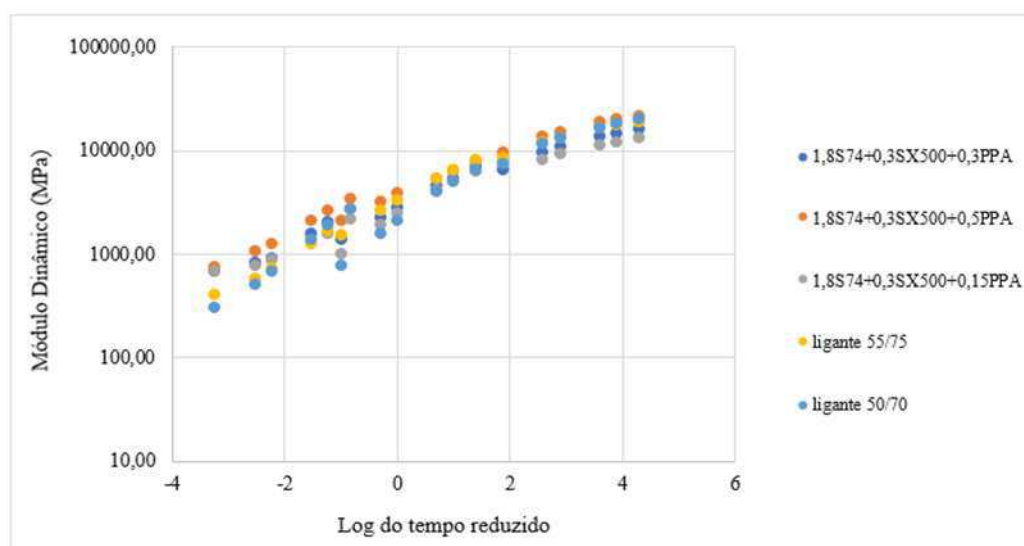
Segundo Brown *et al.* (2010), o módulo de resiliência de misturas asfálticas faz referência ao módulo de elasticidade deste material. Desta forma quanto mais rígido o material for, maior será o MR. No entanto ligantes muito rígidos e que não têm elasticidade, podem resultar ao pavimento uma vida de fadiga menor. Por essa razão para entender melhor o efeito da rigidez e resistência das amostras, é preciso se aprofundar no estudo das mistura por meio de outros ensaios como o ensaio módulo dinâmico e deformação permanente.

4.2.5 Módulo Dinâmico

Com os dados do ensaio realizado na AMPT nas temperaturas de 4,4°C; 21,1°C e 37,8°C foram traçadas e estudadas curvas mestras do módulo dinâmico em função do tempo.

As curvas traçadas foram feitas seguindo o método presente no documento ‘E*, Dynamic Modulus: Test Protocol – Problems na Solutions’ do Departamento de Transportes dos EUA. A Figura 34 apresenta todas as curvas mestras em um único gráfico.

Figura 34 - Resultado de módulo dinâmico em função da frequência de aplicação de carga



Observa-se que na zona de alta frequência (elevado volume de tráfego), as misturas com ligantes modificados mantiveram a rigidez das misturas com o ligante puro 50/70 e modificado 55/75, já na zona de baixa frequência (baixo volume de tráfego), as misturas modificadas apresentaram rigidez superior a rigidez do ligante puro.

As curvas apresentadas na Figuras: 35, 36 e 37 são mais uma forma escolhida para apresentar os resultados do ensaio de módulo dinâmico, para todas as misturas por temperatura de ensaio. Percebe-se que a introdução dos modificadores (S74, SX500 e PPA) ao ligante puro 50/70 afetou o parâmetro de rigidez da mistura, avaliada por meio da aplicação de carga em diferentes frequências, sendo a mistura do tipo E a que apresentou maiores valores de módulo dinâmico em todas as temperaturas estudadas.

Figura 35 - Módulo dinâmico das misturas à 4°C

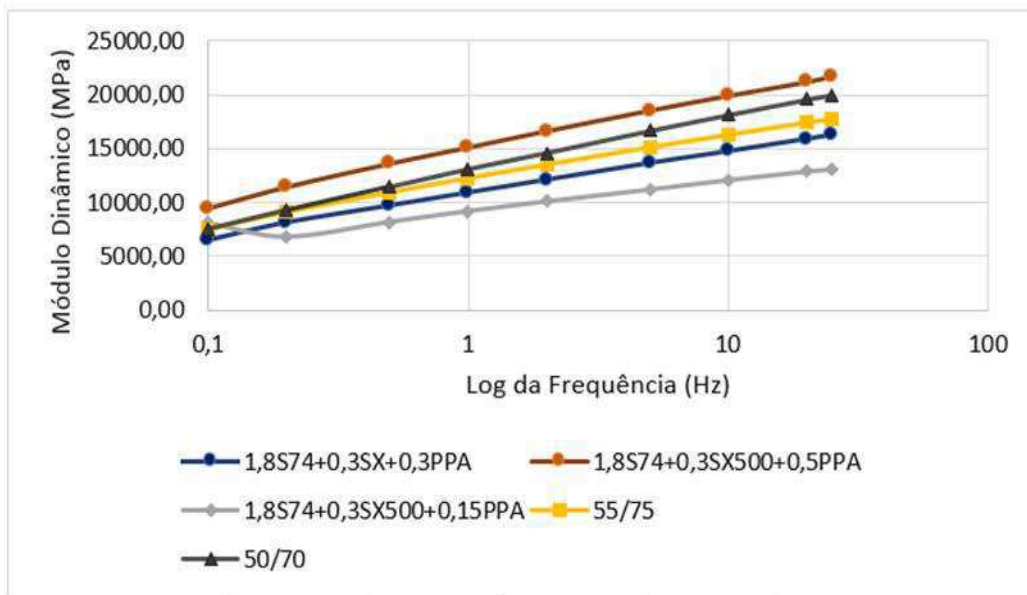


Figura 36 - Módulo dinâmico das misturas à 21°C

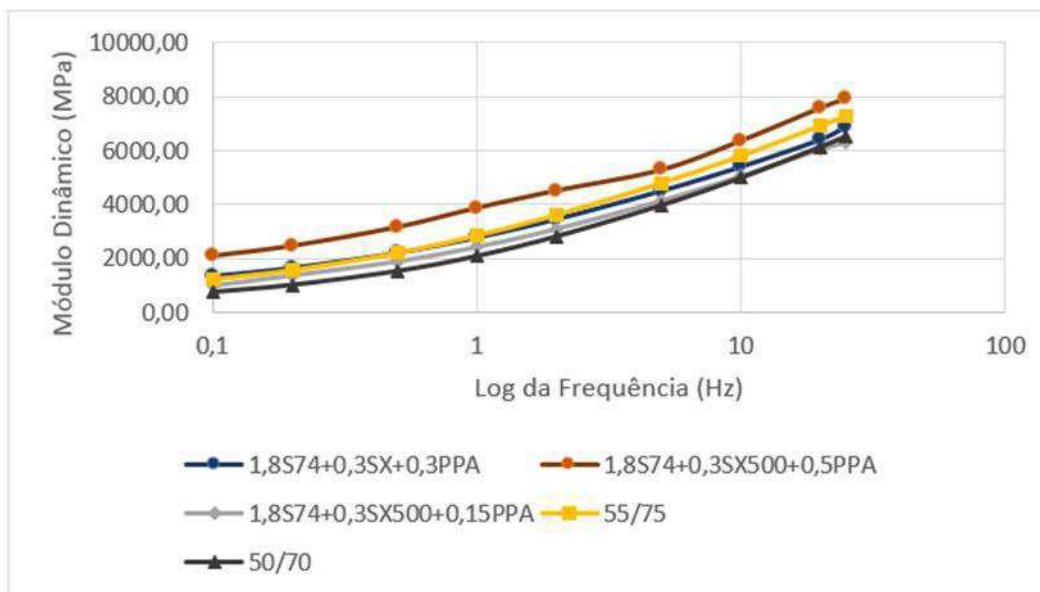
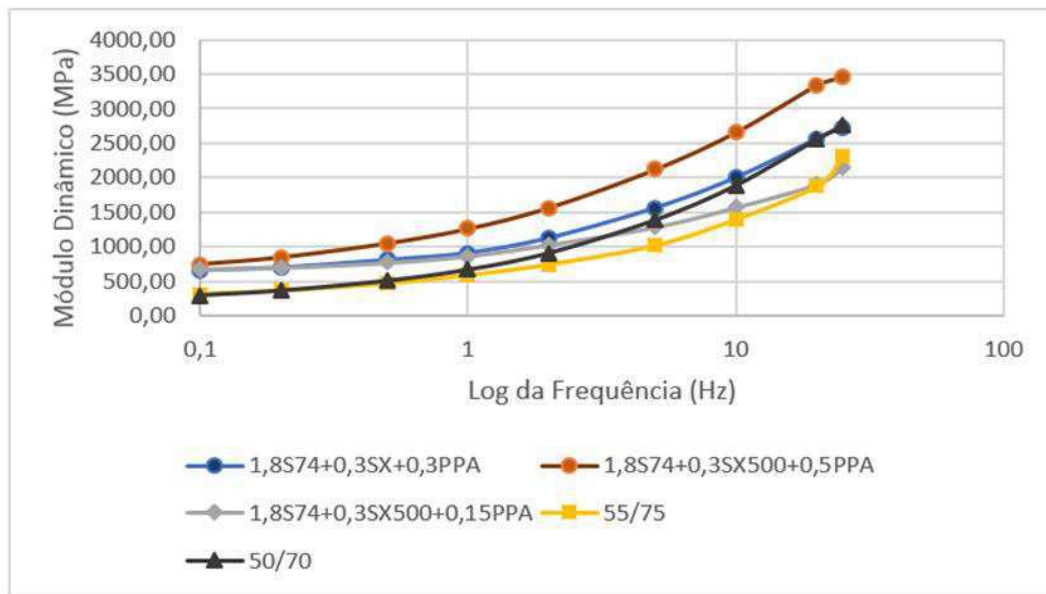


Figura 37 - Módulo dinâmico das misturas à 37°C



A temperaturas mais elevadas os resultados do ensaio de módulo dinâmico mostra bem o efeito do polímero como modificador na variação da rigidez da amostra sob variadas condições de frequência (volume de tráfego), isso porquê, de acordo com Domingos e Faxina (2015), Jasso *et al.*, (2015) e Gama *et al.*, (2016), as propriedades do ligante modificado com polímero reativo e ácido polifosfórico só se destacam em elevada temperatura pelo aumento da elasticidade do ligante asfáltico, favorecendo à resistência a deformação da amostra assim como melhoria na rigidez .

A diferença entre o pulso de tensão e o pulso de deformação é o ângulo de fase, onde o mesmo é uma propriedade visco elástica das misturas asfálticas. As Figuras 38, 39 e 40 apresentam os ângulos de fase referentes às frequências de carregamento nas três temperaturas estudadas.

Figura 38 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento ($T=4^{\circ}\text{C}$)

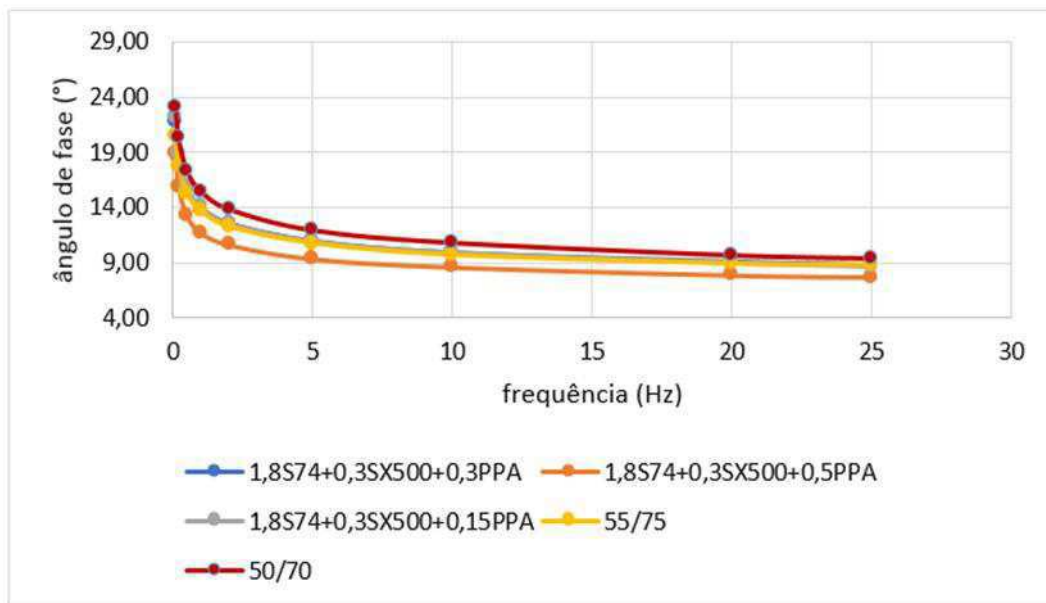


Figura 39 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento ($T=21^{\circ}\text{C}$)

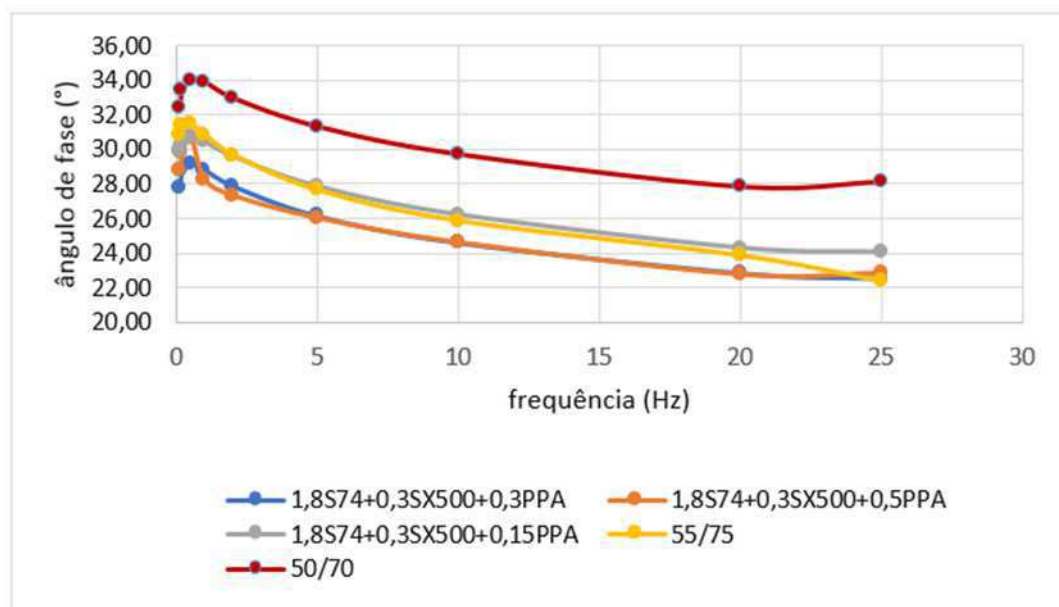
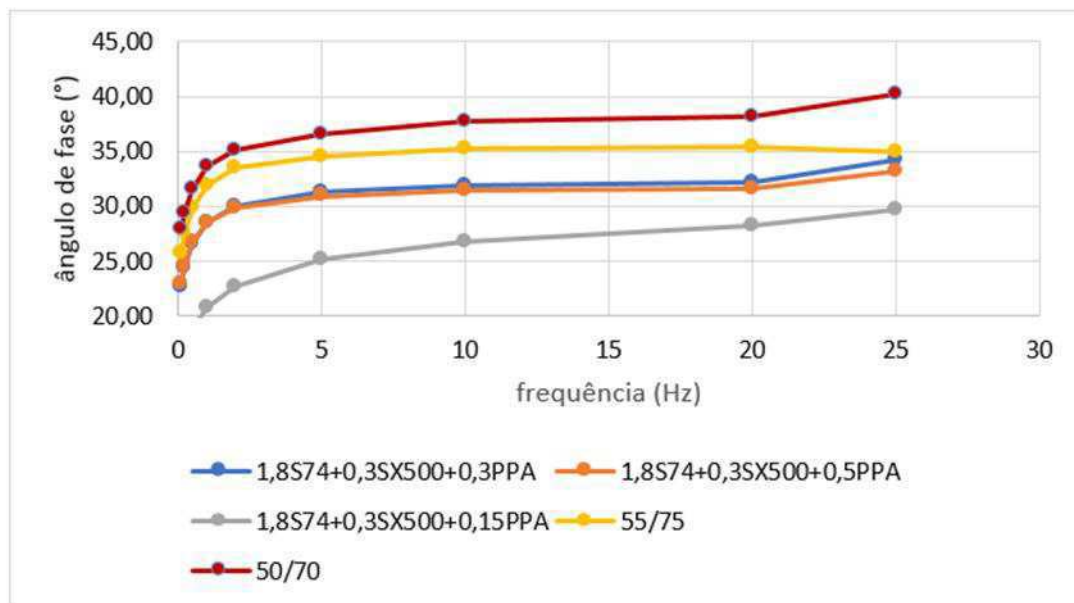


Figura 40 - Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento ($T=37,7^{\circ}\text{C}$)

A partir dos gráficos de angularidade das misturas estudadas é possível observar que o ângulo de fase aumenta com a elevação da temperatura e diminui com o aumento da frequência. Contudo essa tendência de diminuição da angularidade com o aumento da frequência permanece até a temperatura de 21°C , a partir da temperatura de $37,7^{\circ}\text{C}$ ocorre o inverso, com o aumento da frequência há uma tendência de crescimento do ângulo de fase.

Segundo Costa *et al.*, (2017) o ângulo de fase a baixa frequência e a temperatura elevada é afetado pelo agregado e a maior parte da energia dissipada se dá devido a interação ligante-agregado que apresenta uma tendência de diminuição do ângulo de fase. Sendo assim é possível observar que a baixas frequências e altas temperaturas as misturas modificadas apresentaram ângulo de fase menor, levando a crer que a maior parte da energia foi dissipada no comportamento viscoelástico das misturas modificadas, podendo assim dizer que esse comportamento da mistura pode ser atribuído ao ligante presente na mistura.

4.2.6 Deformação Permanente (*Flow Number*)

Os resultados de FN para às misturas de ligante puro e modificados estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Ensaio *Flow number* das misturas asfálticas

Ligante Asfáltico	Código	Número de Ciclos	Deformação Acumulada (<i>microstrans</i>)	<i>Flow Number</i>
CAP 50/70	A	564	50.095	131
CAP 55/75	B	2480,5	50.127	695,5
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,15 PPA	C	10.000	8.678	5.253
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,3 PPA	D	10.000	9.429	9.739
1,8 S74 + 0,3 SX + 0,5 PPA	E	10.000	11.211	6.436

O FN da mistura com o ligante puro (A) foi de 131, atingido à 564 ciclos, à mistura B de ligante modificado 55/75 apresentou uma deformação plástica de 695,5 com aplicação de 2480,5 ciclos. Já às amostras com ligantes C, D e E apresentaram respectivamente 5.253; 9.739; 6.436 de FN e deformações permanentes de 8.678; 9.429 e 11.211 *microstrans* atingidas e ensaio finalizado, pois alcançaram o número máximo de 10.000 ciclos.

Na Tabela 19 apresenta o critério utilizado por Nascimento (2008), classifica o volume de tráfego de acordo com o FN mínimo exigido para classificar os níveis de tráfego em médio, pesado e extremamente pesado.

Tabela 19 - Valores mínimos de *Flow Number* para diferentes níveis de tráfego

Pesquisa	Médio	Pesado
Nascimento (2008)	300	700

Observa-se que a maior resistência a deformação permanente foi a encontrada na mistura D, onde a mesma apresentou um FL 23 vezes maior que o mínimo sugerido para o tráfego pesado, um FL 74 vezes maior que o FL do ligante puro e 14 vezes superior ao modificado com SBS encontrado no mercado.

Observa-se que a amostra A pode ser classificada como resistente ao tráfego médio, as amostras B, C, D e E podem ser classificadas para tráfegos pesado, apresentando elevada resistência à alta temperatura. Segundo Gama *et al* (2016) isto ocorre devido ao efeito elastomérico do polímero Polimul S74 que junto ao Polimul SX500 e ao PPA como catalizador, aumentam a resistência a deformação. As misturas com os modificadores utilizados nesta pesquisa, apresentaram de forma consistente baixa deformação acumulada diante de elevado número de ciclos, com valores significativamente maiores do que a mistura com o ligante puro.

Nos resultados dos ensaios com os ligantes convencional e modificados apresentados anteriormente, observou-se que a modificação do ligante asfáltico com variados teores de polímero reativo, com o polímero não reativo e o ácido polifosfórico, conferiram uma melhoria da resistência a deformação plástica do ligante asfáltico. Com isso é possível observar a semelhança no comportamento mecânico de cada uma das misturas, com os diferentes ligantes modificados. O efeito semelhante em misturas asfálticas do tipo C, D e E quando comparados a mistura A e B, submetidos à alta temperatura a rigidez e a elasticidade é mantida devido aos modificadores utilizados, fazendo com que estas amostras ao aliviar os esforços aplicados permaneçam flexíveis. Com estes resultados leva a crer que o ligante modificado aplicado em mistura asfáltica submetida a elevada temperatura aumenta a vida de serviço do pavimento.

A Tabela 20 é um resumo dos ensaios físicos e mecânicos com os ligantes convencional e modificados e suas respectivas misturas asfálticas

Tabela 20 - Resumo dos Ensaios com os ligantes e misturas

	A	B	C	D	E
CAP 50/70 (%)	100	-	97,75	97,60	97,40
CAP 55/75 (%)	-	100	-	-	-
PolímulS74	-	-	1,80%	0,30%	0,15%
PolímulSX500	-	-	1,80%	0,30%	0,30%
PPA106%	-	-	1,80%	0,30%	0,50%
Penetração (mm/10)	64 ★	51,5 ●	47 ●	47 ●	41,5 ●
Porcentagem de Penetração Retida (%)	79,69 ★	56,31 ✖	76,6 ●	61,7 ●	96,38 ●
Ponto de Amolecimento(°C)	48,75 ★	58,6 ✖	66,5 ●	69 ●	74 ●
Variação do Ponto de Amolecimento (°C)	5,75 ★	4,9 ●	7,5 ✖	4,25 ●	1,15 ●
Recuperação Elástica (%)	2	81 ✖	87 ●	86,41 ●	87 ●
Perda de Massa (%)	0,176	0,19	0,1	0,03	0,03
Viscosidade Rotacional a 135°C (cP)	420 ★	833,75 ●	2050 ●	2450 ●	2850 ●
Viscosidade Rotacional a 150°C (cP)	209 ★	400,5 ●	900 ●	1017,5 ●	1174 ●
Viscosidade Rotacional 177°C (cP)	77 ★	150 ●	272,5 ●	292,5 ●	324,75 ●
Resistência a Tração	1,55	1,72	1,73	1,72	1,68
Lottman Modificado (RRT(Mpa))	50	70	82 ●	89 ●	78,6 ●
Desgaste Cântabro (%)	8,28	4,8	6,8	3,5	3,61
Módulo de Resiliência (MPa)	8220	9000	8224	8364	5819
Porcentagem de Recuperação Retardada (%)	26,75	25,62	25	24	27
Módulo Dinâmico (MPa)	As misturas modificadas apresentaram maior módulo e menor ângulo				
Deformação Permanente (FN)	131	695,5	5253	9739	6436

● De acordo com os limites de especificação para ligante elastomérico 60/85-E, segundo ANP n° 04/2010.

✖ Não estão de acordo com os limites de especificação para ligante elastomérico 60/85-E, segundo ANP n° 04/2010.

★ De acordo com as normas do DNIT

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

A modificação do ligante puro 50/70 com Polimul S74, Polimul SX500 e Ácido Polifosfórico, contribui para o aumento da rigidez e das propriedades elásticas, além da melhoria do desempenho à altas temperaturas;

Nas análises mecânicas com o ligante modificado em relação ao ligante puro 50/70 e modificado 55/75 é possível observar o aumento da resistência ao rompimento, no ensaio de módulo de resiliência observou-se que pouco contribuiu para a recuperação elástica a temperatura de 25°C;

Todos os ligantes modificados apresentaram ganho de RRT significativo quando observado em relação as misturas A e B, compostas respectivamente por CAP 50/70 e ligante 55/75. Destaque para a mistura D (1,8S74 + 0,3SX500 + 0,3PPA) com ganho de quase 80% em relação a mistura A e de 27% em relação a mistura B.

A resistência a abrasão aferido com a realização do ensaio cântabro, apresentou o aumento significativo ao desgaste das misturas com os ligantes modificados C, D e E. O ganho de resistência a abrasão chegou a mais de 57% em relação a mistura com o CAP puro e 27% de resistência a mais que a mistura composta com o ligante 55/75;

As misturas asfálticas com 1,8S74 + 0,3 SX500 e 0,3 e 0,5 PPA apresentaram módulo dinâmico superior a mistura com ligante convencional 50/70 (A) e modificado 55/75 (B);

A modificação do ligante puro contribuiu significativamente para a resistência a deformação permanente. Nas condições de ensaio utilizada as misturas asfálticas com ligantes modificados não apresentaram deformação permanente. Confirmando que o ligante modificado com o polímero reativo (S74), não reativo(SX500) e ácido polifosfórico (PPA116%) nas proporções analisadas é altamente resistente a deformação permanente

A mistura asfáltica com o Polimul S74, Polimul SX500 e PPA pode ser uma boa opção para aplicação em regiões de temperaturas elevadas, como a do Nordeste brasileiro, onde a principal preocupação é com a deformação permanente.

Este ligante modificado é uma boa opção para lugares em que é preciso um revestimento asfáltico de alta qualidade e resistência a deformação permanente, devido à dificuldade para interromper o tráfego de veículos.

6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Estudar o comportamento mecânico de misturas asfálticas modificadas por outros teores de Polimul S74, Polimul SX-500 e PPA variando o teor do polímero reativo e do ácido polifosfórico;
- Estudar a química por meio de cromatografia gasosa para identificação das frações SARA dos ligantes modificados nos teores de 1,8% Polimul S74, 0,3% Polimul SX-500 e 0,3 PPA; 1,8% Polimul S74, 0,3% Polimul SX-500 e 0,5 PPA;
- Avaliação empírico-mecanicista para verificação do desempenho das misturas em termos de fadiga, em estruturas de pavimentos flexíveis.
- Investigar a resistência a deformação permanente em outras temperaturas e com aplicação de cargas mais elevadas;
- Complementar o estudo com um trecho experimental, utilizando ligante modificado com composição 1,8% Polimul S74, 0,3% Polimul SX-500 e 0,3 PPA para análise do desempenho em campo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184** Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. São Paulo – SP, 2007.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, **AASHTO T 283** *Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture Induced Damage*. Washington, D. C, 2007.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, **AASHTO T 62**: Determining modulus of hot mix asphalt (HMA). Estados Unidos, 2009.
- ANITELLI, A. Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- ABNT, 2000, Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento Método do anel e bola. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT **NBR 6560**.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO – ANP. **Nº32**. Especificações dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímeros SBS. 2007.
- ASTM D6925 - 2009 Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor.
- ASTM D2572-97(2010) Standard Test Method for Isocyanate Groups in Urethane Materials or Prepolymers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- AIREY, G. D. (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 16, issue 8, p. 473-487.
- Arnold, T. (2008). Phosphoric Acid as an Asphalt Modifier Guidelines for Use: Acid Type. FHWA.
- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: Materiais, projetos e restauração. Oficina de textos. São Paulo, 558p, 2007.
- BAUMGARDNER, G.L. et al., (2005). Polyphosphoric acid modified asphalt: proposed mechanisms. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists Long Beach** v.74, p. 283-305.

- BERNNET, T., & Martin, J. (2012). Polyphosphoric Acid in Combination With Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer. Transportation Research Board circular E-C 160, p 70-85.
- BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007. 501p.
- BROWN, E. R., KANDHAL, P. S., ROBERTS, F. L., KIM, Y. R., LEE, D., KENNDY, T. W. **Hot mix asphalt materials, mixture desing, and construction**. 3 ed. NAPA Reserch and Education Foundation. Lanham, Maryland, 2010. 720 p
- BULATOVIC, V. O.; REK, V.; MARKOVIC, J. Rheological Properties of Bitumen Modified with Ethylene Butylacrylate Glycidyl Methacrylate. **Polymer Engineering & Science**, v. 54, n. 5, p. 1056-1065, 2014.
- CASOLA J. Modified asphalt marked 2005-2006. **He Association of Modified Asphalt Producers Meeting**; 2006.
- COMINSKY, R. J. ; KILLINGSWORTH, B. M ; ANDERSON, R. M. ; ANDERSON, D. A ; CROCKFORD, W. W. **Quality control and acceptance of SUPERPAVE – designed hot mix asphalt**. National Cooperative Highway Research Program, report 409, p. 1-26. 1998.
- D'ANGELO, J. Multi-Stress Creep and Recovery Test Method a New Specification. Association of Modified Asphalt Producers Annual Conference. Austin, EUA, 2008.
- DNER. (1998). Glossário de Termos Técnicos Rodoviários. Rio de Janeiro.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 035/98. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 081/98. Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 083/98. Agregados – Análise Granulométrica . Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 131/2010. Determinação do Ponto de Amolecimento- método Anel e Bola. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transporte, ME 130/2010. Determinação da Recuperação Elástica de Materiais Asfálticos pelo Ductilometro. Rio de Janeiro, 2010.

- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 135/2010. Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 138/94. Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 155/2010. Determinação da Penetração. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT- Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 1996.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – ME 129/2011. Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – ME 005/2003. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 2003.
- DOMINGOS, M., & FAXINA, A. (2013). Avaliação do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com SBS e PPA. *Revista Transporte*, pp. 51-58.
- FEE, D., MALDONADO, R., REINKE, G., ROMAGOSA, H., D'ANGELO, J. A. Effect of Polyphosphoric acid on asphalt binder properties. *Transportation Research Circular E-C160*, p.27- 39, 2010.
- FERNANDES, M. R. S. **Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de CAPs modificados com SBS. 2009.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- FERNANDES, R., Fortes, M., & Leite, F. (2008). Reologia de asfaltos modificados com SBS. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP
- GAMA, D. A.; ROSA, J.M.; DE MELO, T. J. A.; RODRIGUES, J. K. G. Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. **Construction and Building Material**, v. 106, p. 290-295, 2016.
- GAMA, D. A. **Efeito da Adição de Polímeros Reativos, Não-Reativos e Ácido Polifosfórico e suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos.** 2016. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

- GIVARINE, C.; FILIPPIS, P. DE; SANTARELLE, M. L.; SCARSELLA, M.; CHIMICA, D.; LA, R.; EUDOSSIANA, V. Production of stable polypropylenemodified bitumens. **Fuel**, v. Vol. 75, n. No. 6, p. 681-686, 1996.
- GRANDE, W. (2011). Efeito da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas. Dissertação de Mestrado. EESC/USP.
- JASSO, M.; HAMPL, R.; VACIN, O.; BAKOS, D.; STASTNA, J.; ZANZOTTO, L. Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elyaloy and polyphosphoric acid. **Fuel Processing Technology**, 2015.
- KALANTAR, Z, N, N.; KARIN, M. R.; MAHREZ, A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. **Construction and Building Materials**, Volume 33, August 2012, Pages 55-62.
- 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.
- LEITE, L. F.M., BITTENCOURT, C. P., NASCIMENTO, L. A. H. Efeito do ácido polifosfórico no desempenho dos ligantes rodoviários. In: XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Florianópolis, 2004.
- LESUEUR, D. The colloidal structure of betumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of betumen modification. **Advances in Colloid and Interface Science** Elsevier B. V., 2009.
- MARQUES, **Geraldo Luciano de Oliveira. Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** 2004. 461f. Trabalho de conclusão de curso (Tese) – Doutorado em Ciências em Engenharia Civil. Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004
- MASSON, J-F (2008). Brief review of the chemistry of polyphosphoric acid (PPA) and betumen. **Energy & Fuels**. ACS Publications, v. 22, n. 4, p. 2637-2640.
- MARTIN, J. V.; BAUMGARDNER, G. L. A New Method to Produce Polymer Modified Asphalt with Crumb Rubber and Polyphosphoric Acid: Combining Recycling and Performance, Asphalt Rubber Conference, p.903-930, 2006.
- MOTHE, M. G. **Estudo do Comportamento de ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica.** 2009. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

- NEGRÃO, A. P. **Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do tipo RET para Aplicação em Pavimentos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- NUÑEZ, J., FAXINA, A., GIGANTE, A., DOMINGOS, M., & SUAREZ, D. (2012). Propriedades mecânicas de misturas asfálticas preparadas com ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET.
- PALACCO, G.; BERLINCIONI, S.; BIONDI, D.; STASTNA, J.; ZANZOTTO, L. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. **European Polymer Journal**, v. 41, p. 2831 – 2844, 2004.
- POLACCO, G.; FILIPPI, S.; MERUSI, F.; STASTNA, G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts; Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 224, p. 72-112, 2015.
- POLACCO, G.; STASTNA, J.; VLACHOVICOVA, Z.; BIONDI, D.; ZANZOTTO, L. Temporary Networks in Polymer-Modified Asphalts. **Polymer Engineering and Science**. Vol. 44, nº.12 December 2004.
- PAMPLONA, T. F. **Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013. Dissertação (Mestrado).
- PAMPLONA, T. F.; SOBREIRO, F. P.; FAXINA, A. L.; FABBRI, T. P. Propriedades Reológicas sob altas temperaturas de ligantes asfálticos de diferentes fontes modificados com ácido polifosfórico. **Revista Transportes**, 2012.
- PERES-LEME, a., MARTINEZ-BOZA, F.J., ATTANE, P., GALLEGOS. C. Destabilization mechanism of polyethylene-modified bitumen. **Jornal of Applied Polymer Science**; 110(1): 260-267, 2006.
- SOBREIRO, F.P. **Efeito a adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com polímero SBS 2014**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- Shell. (2003). **The Shell bitumen handbook** (Fifth edition ed.)
- SHIVOKLIN, M.; GARCIA-MORALES, M.; PARTAL, P.; CUADRI, a. a.; GALLEGOS, C. Reological behavior of polymer-modified bituminous mastic: A comparative analysis between physical and chemical modification. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 234-240, fev. 2012.
- TOPAL, A. Evaluation of the properties and microstructure of plastomeric polymer modified bitumens. **Fuel Processing Technology**; 91(1): 45-51. 2010.

- VARELA, L. M.; SILVA, C. C. V. P.; GAMA, D.A; RODRIGUES, J.K.G. Estudo da modificação de ligante asfáltico utilizando terpolímero reativo, ácido polifosfórico e polietileno de alta densidade para aplicação em misturas asfálticas. **45ª RAPv, Reunião Anual de Pavimentação**. ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação, nos dias 20 a 23 de setembro de 2016, Brasília-DF.
- XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S.; WANG, H.; HAO, O. Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 316-323, 2014.
- YAN, K.; ZHANG, H.; XU, H. Effect of polyphosphoric acid on physical properties, chemical composition and morphology of bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 92-98, out. 2013.
- ZHU, J.; BIRGISSON, B.; KRINGOS, N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. **European Polymer Journal**, v. 54, n. 1, p. 18-38, 2014