



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO LIGANTE  
ASFÁLTICO CAP 50/70 MODIFICADO POR ADIÇÃO DE PET  
TRITURADO**

**ANA LETÍCIA NÓBREGA RABELLO TAVARES**

Orientadores: John Kennedy Guedes Rodrigues.  
PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 13 de dezembro de 2018

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO  
LIGANTE ASFÁLTICO CAP 50/70 MODIFICADO POR ADIÇÃO  
DE PET TRITURADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 13 de dezembro de 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANA LETÍCIA NÓBREGA RABELLO TAVARES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Campina Grande como requisito para  
obtenção do grau de bacharel em  
Engenharia Civil.

Área de habilitação: Geotécnica.

Sub-área: Pavimentação

Orientadores: John Kennedy Guedes Rodrigues  
PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro/2018

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida, pelo amor infinito, pelas missões que a mim atribuiu. O altíssimo, onipotente, que ilumina os meus dias, abençoa os meus passos e me deu forças para trilhar o caminho até aqui.

Àqueles que como presente do Senhor recebi para serem meus pais, Artur Tavares e Patrícia Tavares, agradeço pelos esforços realizados, pela confiança sempre a mim destinada e por sempre estarem presentes, mesmo que distantes fisicamente, durante esses longos últimos anos. Obrigada por cada incentivo, orientação e pelas orações em meu favor.

À minha irmã, Marina, a quem tem enorme admiração. Uma fonte de inspiração e um amor inexplicável. Sua devoção e dedicação por tudo o que fez, sua vontade de sempre ser melhor me estimula a alcançar meus objetivos.

Aos meus avós maternos, Marlene Nóbrega e Diogo Rabello, por sempre terem colocado meu nome em seus pensamentos e orações e por vibrarem a cada conquista. Essa fé me proporcionou inúmeras bênçãos. Também, aos meus avós paternos (in memoriam), Maria Amália e Emanuel Nazareno, que, de onde estiverem, sei que me abençoaram na caminhada e estariam vibrando por essa conquista.

A todos os meus familiares, pela compreensão nos momentos em que me fiz ausente, pelas orações que sempre me tiveram como intenção, e ainda pelo cuidado e carinho que me deram.

À minha professora orientadora PhD. Ana Maria Gonçalves, por ter acolhido a nossa pesquisa e me auxiliado a chegar ao resultado final. Agradeço pela disponibilidade e atenção que me concedeu.

A Conrado Cesar, por não ter poupado esforços para me auxiliar na execução desse trabalho e em todo o decorrer do curso. Por estar comigo, lado a lado, há dois anos, partilhando cada momento, por sua capacidade de me trazer paz e por sempre ter acreditado em mim.

Aos Amigos e colegas da universidade, em especial Mila Thais, Luis Antônio e Alana, por todo o apoio, pelas noites de preocupação e pelos conhecimentos compartilhados durante toda a graduação. Também aos meus amigos que estão distantes, que mesmo assim não deixaram de estar ao meu lado e me apoiar direta ou indiretamente.

A todos aqueles que encontrei neste caminho, que participaram do meu dia a dia de construção acadêmica, profissional e pessoal, que me auxiliaram a alcançar voos e que vibraram com as conquistas evidenciadas nesta trajetória.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a Deus, autor do meu destino, companheiro de todos os momentos, aos meus pais e minha irmã, responsáveis pela minha maior força.*

*“Mas tu, quando orares, entra no teu aposento e, fechando a tua porta, ora a teu Pai que está em secreto; e teu Pai, que vê em secreto, te recompensará publicamente”.*

*Mateus 6:6*

## Lista de Figuras

Figura 1 - Ligante Asfáltico.....	15
Figura 2 - Estrutura Química do Politereftalato de Etileno .....	23
Figura 3 - PET Micronizado.....	25
Figura 4 - Ilustração do Misturado mecânico- LEP/DEC/UFCG.....	30
Figura 5- Ilustração do Envelhecimento a Curto Prazo - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. ....	31
Figura 6- Ilustração do Penetrômetro - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.....	32
Figura 7-Ilustração do Ensaio de Ponto de Amolecimento - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. ....	33
Figura 8- Ilustração do Ensaio de Recuperação Elástica - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG. ....	34
Figura 9-Ilustração do Viscosímetro Rotacional - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.....	35
Figura 10 - Equipamento FTIR (modelo Spectrum 400 Series).....	36
Figura 11-Esquema de funcionamento de um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier.....	36
Figura 12 – Variação da perda de massa .....	37
Figura 13 - Ensaio de penetração .....	38
Figura 14 - Penetrações Retidas.....	39
Figura 15- Gráfico dos resultados do ensaio de ponto de amolecimento.....	40
Figura 16 - Viscosidade Rotacional dos ligantes estudados antes do envelhecimento.....	42
Figura 17 - Resultados do Ensaio de Viscosidade Rotacional .....	43
Figura 18 - Viscosidade Rotacional dos ligantes estudados após envelhecimento.....	45
Figura 19 – Gráfico dos Resultados de Recuperação elástica.....	46
Figura 20 - Espectro FTIR para o CAP 50/70.....	47
Figura 21 - Espectro FTIR para o CAP 50/70 modificado com 2% de PET .....	48
Figura 22 - Espectro FTIR para CAP 50/70 modificado com 3% de PET .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Especificação brasileira (Resolução n. 19 da ANP, 11/07/2005) para cimento asfáltico de petróleo – CAP .....	14
Tabela 2 - Tabela dos resultados de IST .....	41
Tabela 3 - Temperaturas de Usinagem e Compactação .....	44



## LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AMP → Asfalto modificado com polímero

ANP → Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível

ASTM → American Society for Testing and Material

CAP → Cimento asfáltico de petróleo

CNT → Confederação Nacional do Transporte

DEC → Departamento de Engenharia Civil

DNER → Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT → Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

FTIR → Fourier-transform Infrared Spectroscopy

IST → Índice de Susceptibilidade Térmica

LEP → Laboratório de Engenharia de Pavimentos

PET → Politereftalato de Etileno

SBS → Estireno-Butadieno-Estireno

TUC → Temperatura de Usinagem e Compactação

UFCG → Universidade Federal da Paraíba

## RESUMO

O ligante asfáltico é um material complexo, tanto do ponto de vista de composição química como de propriedades reológicas. Apresenta um comportamento viscoso, caracterizado pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga, e susceptibilidade térmica caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura. A modificação de ligantes asfálticos é uma prática que visa aumentar a resistência às deformações permanentes, trincas ocasionadas por fadiga ou por variações térmicas, além de, conseqüentemente, melhorar as condições de segurança e conforto das rodovias e reduzir custos com manutenções. Assim, este estudo tem como objetivo estudar as propriedades físicas e químicas do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de PET. Foram utilizados os teores de adição de 1%, 2% e 3% de PET, realizando-se, para a caracterização física, os ensaios de viscosidade, ponto de amolecimento, recuperação elástica e penetração com o ligante antes e após envelhecimento a curto prazo-RTFO e, para caracterização química, o FTIR. A adição do PET ao CAP 50/70 se mostrou como uma boa solução para a destinação deste rejeito, se revelando proveitoso em diversos aspectos físicos. O polímero adicionado agiu aumentando a rigidez, quando comparado ao CAP puro, apresentando, com 3% de PET, um acréscimo de ponto de amolecimento da ordem de 15%, provando suas propriedades termoplásticas e podendo ser aplicado em serviços mais pesados e em temperaturas de utilização mais elevadas, no entanto, sendo necessário um maior gasto energético. Quando comparado ao CAP 55/75E, esse cenário se mostra oposto, sendo este mais rígido que a mistura do PET ao ligante. Nesta comparação, observou-se, ainda, que a maior separação de fases ocasionada pela mistura do PET ao ligante resultou em uma maior perda de massa e diminuição da sua capacidade de recuperação elástica. Por fim, a partir da caracterização química foram encontrados grupos  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$  (alifático) e  $\text{C=O}$  (carbonila), além de ter sido comprovado o efeito antioxidante da adição do PET ao ligante.

**Palavras-chave:** ligante asfáltico; caracterização; pavimentação.

## ABSTRACT

Asphaltic binder is a complex material, both from the point of view of chemical composition and rheological properties. It has a viscous behavior, characterized by the decrease of stiffness for long periods of application of load, and thermal susceptibility characterized by the alteration of properties (viscosity, stiffness, consistency) as a function of temperature. The modification of asphalt binders is a practice that aims to increase the resistance to permanent deformation, cracks caused by fatigue or thermal variations, as well as, consequently, improve the conditions of safety and comfort of the highways and reduce costs with maintenance. Thus, this study aims to study the physical and chemical properties of modified asphalt binder CAP 50/70 by addition of PET. The addition contents of 1%, 2% and 3% of PET were used for the physical characterization of the viscosity, softening point, elastic recovery and binder penetration before and after short-term aging -RTFO and, for chemical characterization, the FTIR. The addition of PET to the CAP 50/70 proved to be a good solution for the destination of this waste, proving to be beneficial in several physical aspects. The polymer added increased stiffness, when compared to the pure CAP, with a 3% PET, a softening point increase of 15%, proving its thermoplastic properties and can be applied in heavier services and at higher usage temperatures, however, would require a greater energy expenditure. When compared to the CAP 55 / 75E, this scenario is opposite, which is more rigid than the mixture of PET to the binder. In this comparison, it was also observed that the greater separation of phases caused by the mixing of the PET to the binder resulted in a greater loss of mass and decrease of its elastic recovery. Finally, from the chemical characterization were found CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub> (aliphatic) and C = O (carbonyl) groups, in addition to having been proved the antioxidant effect of the addition of PET to the binder.

**Key words:** asphalt binder; characterization; paving.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1. JUSTIFICATIVA .....	10
1.2. OBJETIVOS .....	10
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	10
1.2.2. Objetivos Específicos.....	11
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC	11
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
2.1. CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO - CAP .....	13
2.1.1. Envelhecimento .....	16
2.1.2. Composição química do CAP .....	17
2.2. LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS.....	19
2.3. LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS .....	20
2.4. POLITERAFTALATO DE ETILENO (PET) .....	23
2.4.1. Utilização do PET na Construção Civil .....	25
2.4.2. Ligantes Asfálticos Modificados com PET .....	26
2.5. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER – FTIR.....	28
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1. MATERIAIS .....	29
3.2. MÉTODOS .....	30
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>36</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	36
4.1.1 Perda de massa.....	37
4.1.2 Ensaio de Penetração.....	38
4.1.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento .....	40
4.1.4 Ensaio de Viscosidade Rotacional.....	42
4.1.5 Ensaio de Recuperação Elástica .....	46
4.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....	47
4.2.1. Espectroscopia no Infravermelho para Transformada de Fourier – FTIR.....	47
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>50</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	50
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	51
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Como afirma Queiroz (2016), pavimentos podem ser descritos como estruturas projetadas para suportar os esforços impostos pelo tráfego de veículos e as intempéries climáticas, proporcionando aos seus usuários as condições de rolamento adequadas, traduzidas em: conforto e segurança. Segundo Bernucci et al. (2007), no Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, material também utilizado em grande parte das ruas.

De acordo com a pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) no ano de 2017, das rodovias pavimentadas avaliadas, 78,4% possuem algum tipo de deficiência na superfície do pavimento, sendo o desgaste a mais comum, presente em 51,1% destas. Considerando a magnitude do modal rodoviário brasileiro, é de suma importância a fabricação de pavimentos que cumpram, de fato, sua vida útil, proporcionem segurança e conforto aos usuários, além de possuírem viabilidade econômica e ambiental.

Bernucci et al., (2007) cita que grande parte dos trabalhos de pavimentação atualmente referem-se à manutenção e ao reforço de rodovias existentes, havendo também maior preocupação com a qualidade da superfície quanto ao conforto e à segurança dos usuários em todas as condições climáticas, o que tem exigido o desenvolvimento de novas concepções de misturas asfálticas com a utilização de asfaltos modificados.

No tocante ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), diversos modificadores são utilizados buscando um aperfeiçoamento das suas propriedades reológicas e mecânicas em relação ao CAP convencional, e entre os diversos modificadores estudados, os polímeros vêm se apresentando como uma excelente alternativa (SOBREIRO, 2014). Para Moghaddam et al. (2012), a utilização de resíduos, como polímeros recicláveis, é uma alternativa de diminuição nos custos da pavimentação, representando, ainda, benefícios ambientais, por dar um destino nobre a possíveis poluentes.

Atualmente, os polímeros, como o Politereftalato de etileno (PET), se apresentam em alta proporção dentre os resíduos sólidos urbanos. O PET é um polímero termoplástico, um dos mais produzidos no mundo, utilizado na fabricação de embalagens, materiais descartáveis, recipientes, entre outros, em geral produtos de curta vida útil. Sua ampla utilização deve-se às suas propriedades mecânicas, térmicas e ao seu custo de produção. Devido à grande quantidade de aplicações e ao seu tempo de degradação relativamente longo, esse polímero é considerado um dos vilões ambientais, tornando sua reciclagem uma questão significativa. No entanto, segundo Tarefder (2010, p. 714-725, apud Silva et al., 2018), esse polímero é de difícil reutilização, devido à fácil absorção de contaminantes, os quais podem afetar produtos alimentícios além de promover a cristalização do produto durante o arrefecimento, aumentando a rigidez do material.

Partindo do exposto, o presente projeto tem por objetivo avaliar a modificação do CAP 50/70 com PET, a partir de suas propriedades físicas e químicas antes e após envelhecimento, através de ensaios de caracterização. Espera-se atestar a eficiência de tal mistura e, por conseguinte, atribuir uma outra finalidade a tal resíduo.

## **1.1. JUSTIFICATIVA**

Este trabalho justifica-se devido ao fato de que a utilização do Politereftalato de etileno nas misturas asfálticas alia a necessidade da concepção de pavimentos com maior desempenho à viabilidade ambiental, além de proporcionar uma diminuição de custos na pavimentação.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar as propriedades físicas e químicas do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado com Politereftalato de etileno.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar fisicamente o ligante asfáltico CAP 50/70 modificado com PET antes e após envelhecimento a curto prazo;
- Caracterizar quimicamente o ligante asfáltico CAP 50/70 modificado com PET antes e após envelhecimento a curto prazo;
- Comparar as propriedades físicas e químicas obtidas para o CAP 50/70 modificado por adição do Politereftalato de etileno com as propriedades apresentadas pelo CAP 55/75 SBS.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC**

O texto deste Trabalho de Conclusão de Curso encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma:

Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos da Pesquisa e Organização do Trabalho de Conclusão de Curso

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados aos ligantes asfálticos, às suas modificações por polímeros e pelo o Politereftalato de etileno.

Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental

Resultados e Discussões – Neste tópico estão apresentados os resultados que foram obtidos para as propriedades físicas e químicas do ligante asfáltico com a adição do Politereftalato de etileno.

Considerações Finais e Sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações obtidas à cerca da pesquisa e sugestões para trabalhos que possam complementar esse estudo.

Por fim, estão as Referências, onde estão listadas as pesquisas citadas neste estudo.



## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP**

O Brasil é um país cujo modal rodoviário corresponde à principal via de circulação de pessoas e bens. Desta forma, para a CNT (2017), assegurar a recuperação e a expansão da nossa malha rodoviária mostra-se imprescindível para permitir um crescimento social e econômico com bases permanentes. O crescimento da frota circulante, o maior peso nos caminhões, aumento da carga por eixo e da pressão de pneus, aliados ao longo espaçamento de intervenções para recuperação e aos fatores naturais, contribuem para a deterioração das estradas do país.

Segundo Bernucci et al. (2007), 95% das estradas pavimentadas brasileiras são de pavimento asfáltico, os quais possuem o revestimento composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento.

Sendo o revestimento asfáltico a camada que recebe maior impacto das cargas solicitantes, o comportamento do ligante asfáltico quanto ao envelhecimento e sua resistência principalmente à fadiga são de suma importância para garantir a durabilidade e qualidade do pavimento.

Como cita o SINICESP (2010), os ligantes asfálticos de petróleo são materiais de consistência variável e cor pardo-escura ou negra, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos de elevada massa molar. Possui como principais componentes o carbono e o hidrogênio, contendo também outros elementos como o oxigênio, enxofre e alguns metais. São obtidos por evaporação natural de depósitos localizados na superfície da terra (jazidas naturais), ou por destilação em refinarias de petróleo. São materiais termoplásticos e viscoelásticos, cujas respostas aos esforços são dadas em

dependência da temperatura e tempo de aplicação de carga: se comportam como materiais semissólidos à temperatura ambiente, como um sólido vítreo a baixas temperaturas e/ou carregamento rápido, e como um fluido viscoso a altas temperaturas e/ou carregamento lento.

O CAP deve seguir especificações ditadas pela resolução normativa n. 19, de 11 de julho de 2005, da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), que classifica-os de acordo com os valores de penetração. Dessa forma, busca-se garantir a qualidade do asfalto definindo critérios de produção e aplicação baseando-se em faixas de aceitação a partir de ensaios mecânicos, físicos e químicos. Atualmente, são utilizadas 4 classificações, como exposto na Tabela 1 (CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200), constituindo-se em produtos básicos para a produção de outros materiais asfálticos.

**Tabela 1-** Especificação brasileira (Resolução n. 19 da ANP, 11/07/2005) para cimento asfáltico de petróleo – CAP

CARACTERISTICAS	UNID.	LIMITES			
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200
Penetração(100g,5s,25°C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200
Ponto de amolecimento em, mín	°C	52	46	43	37
Viscosidade Brookfield					
-a 135°C,SP 21 mín, 20 rpm		374	274	214	155
-a 150°C,SP 21 mín	cP	203	112	97	81
-a 177°C,SP 21 mín		76 – 285	57 – 285	28 - 114	28 - 114
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5) a (+ 0,7) (-1,5) a (+ 0,7) (-1,5) a (+ 0,7) (-1,5) a (+ 0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductilidade a 25 C, mín	Cm	60	60	100	100
EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163 °C , 85 mín					

Varição em massa, máx	%	0,5	0,5	0,5	0,5
Ductilidade a 25 C, mín	Cm	10	20	50	50
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8
Penetração retida, mín*	%	60	55	55	50

(\*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração antes do ensaio. Fonte: Adaptada da ANP, (2013).

O CAP convencional, de acordo com Leite (2003), é um material com características de aderência, plasticidade intensificada com o aumento de temperatura, impermeável, viscoelástico e de pouca reatividade, mostrado na Figura 1.

**Figura 1 - Ligante Asfáltico**



**FONTE:** Da Silva (2010).

De acordo com Azevedo et al., (2009) entre as funções do CAP na pavimentação, as principais são:

- Aglutinante: promove a ligação entre os agregados possibilitando que a mistura asfáltica resista à ação mecânica de desagregação, produzida pelas cargas dos veículos;

- Impermeabilização: garante ao revestimento vedação eficaz contra a ação da água, proveniente das chuvas, evitando danos ao pavimento;
- Flexibilidade: promove ao pavimento uma maior resistência à deformação permanente.

Ainda conforme Azevedo et al., (2009) esse corresponde ao melhor material para cumprir essas funções simultaneamente e de forma econômica. No entanto, os mesmos destacam que, apesar disso, o CAP apresenta limitações, tais como: em determinadas misturas a presença de umidade na interfase agregado/CAP leva à perda de material pétreo; à resistência à tração do asfalto diminui à medida que o mesmo é flexionado, ou seja, o asfalto perde sua resistência mecânica quando o pavimento sofre deflexões; em baixas temperaturas, se torna rígido e quebradiço, sujeito à trincas, enquanto que em altas temperaturas, amolece e flui, causando deformações permanentes; e ainda apresenta uma tendência ao envelhecimento oxidativo.

### **2.1.1. Envelhecimento**

Um dos fatores que influenciam o desempenho e as características físicas, químicas e reológicas do ligante asfáltico é o fenômeno conhecido como envelhecimento. Conforme Mello (2014), o processo de envelhecimento do asfalto ocorre desde sua fabricação na refinaria até seu último dia de vida em uma rodovia. Além de alterar as propriedades citadas, esse fenômeno causa um aumento na consistência, provocando, um aumento da rigidez da mistura asfáltica, se tornando mais suscetível à fissuração e desagregação.

Dessa forma, o envelhecimento do ligante que ocorre durante a usinagem, aplicação e vida de serviço é um dos fatores responsáveis pela diminuição da durabilidade das misturas asfálticas. Esse fenômeno possui várias causas, sendo a principal delas a oxidação que causa um aumento de consistência do ligante asfáltico, fato esse que, se em elevado grau, principalmente em situações de alto tráfego, pode diminuir significativamente a vida útil do asfalto. O envelhecimento oxidativo do ligante é responsável pela alteração das características físicas, químicas e reológicas do asfalto. Fatores

adicionais, como a temperatura, os efeitos da luz, água e reações químicas com os agregados, também contribuem para este processo.

Segundo Sobreiro (2014) existem muitos mecanismos envolvidos no envelhecimento dos ligantes asfálticos, porém os mais relevantes são a perda de componentes voláteis (saturados e aromáticos) e a reação química do asfalto com o oxigênio do ar. O material pode apresentar tanto ganho quanto perda de massa. Materiais com baixos teores de componentes leves apresentam ganho de massa, porém materiais com altos teores de voláteis geralmente apresentam perda de massa. Isso se deve ao fato que, os componentes leves dos materiais volatilizam, proporcionando perda de massa (evaporação), enquanto a reação entre o oxigênio e o material causa ganho de massa (oxidação).

A respeito do impacto sobre o desempenho do pavimento causado pelo envelhecimento considera-se que:

Como o ligante asfáltico envelhece, isto resulta em um aumento da rigidez deste ligante e, conseqüentemente, da mistura asfáltica. Este efeito tende a aumentar a resistência à formação das trilhas de roda da mistura e pode ser considerado como um efeito benéfico do envelhecimento. Em contrapartida, o envelhecimento pode resultar no desenvolvimento e/ou aceleração de vários tipos de problemas, tais como trincamento e fratura por fadiga, trinca térmica e deterioração devido ao desgaste e à umidade, esforços que podem levar à falência da estrutura do pavimento. (MORILHA, 2004, apud CAVALCANTE, 2016, p.17).

### **2.1.2. Composição química do CAP**

Quando em serviços de pavimentação, o CAP pode ser utilizado com diferentes combinações de esqueleto mineral. Dessa forma, este tem que apresentar-se com uma consistência adequada, ou seja, suficientemente fluído para facilitar a mistura com agregados, e posterior, lançamento e compactação. Em contrapartida, após a compactação, esse deve ter consistência suficiente para resistir às cargas do tráfego e as variações climáticas (ITEN, 2011).

O conhecimento da química do CAP é vital para o esclarecimento de processos que ocorrem na pavimentação, as suas propriedades dependem da fonte e do processo de refino que o originou.

A composição química do asfalto é bastante complexa, podendo variar com a fonte de petróleo, com as modificações induzidas nos processos de refino, durante o envelhecimento na usinagem e em serviço (BERNUCCI et al., 2007).

O CAP é composto basicamente por duas frações, os maltenos - constituídos pelos compostos saturados, aromáticos e resinas, que apresentam baixa polaridade e os asfaltenos - que constituem a fração mais pesada e polar do ligante asfáltico. As propriedades do CAP estão relacionadas com a proporção relativa dos componentes destas frações.

De acordo com Bernucci et al., (2007), os asfaltenos são materiais complexos de peso molecular elevado e constituem de 5 a 25% do teor do CAP. O teor de asfaltenos influencia diretamente nas características reológicas do CAP, ou seja, quanto maior o percentual de asfaltenos maior a viscosidade, a consistência do CAP, e conseqüentemente, valores de penetração mais baixos e ponto de amolecimento maior. Ainda conforme Bernucci et al., (2007) os compostos saturados constituem de 5% a 20% do CAP, são cadeias lineares e ramificadas de hidrocarbonetos, possuem peso molecular igual aos aromáticos e possuem influência negativa na susceptibilidade térmica; as resinas são compostas de pequenas quantidades de hidrogênio, enxofre, nitrogênio e contribuem para a melhoria na ductilidade e dispersão dos asfaltenos; os aromáticos são os compostos que apresentam menor peso molecular, constituem cerca de 40% a 65% do total do CAP, sendo o meio de dispersão e peptização dos asfaltenos.

Em síntese, os compostos saturados influenciam negativamente a susceptibilidade térmica e os aromáticos contribuem para a melhoria de propriedades físicas do ligante. As resinas melhoram a ductibilidade e dispersão dos asfaltenos e estes contribuem com o aumento da viscosidade e tornam os asfaltos menos susceptíveis a variações de temperatura. Os asfaltenos são os mais reativos frente ao oxigênio, seguidos das resinas, aromáticos e saturados.

No decurso do processo de envelhecimento do asfalto verifica-se alterações em sua estrutura química caracterizadas pela diminuição do teor de

aromáticos que se convertem em resina, que por sua vez, parte se transforma em asfaltenos. Ao final do processo, temos uma pequena ou nenhuma variação do teor de saturados e resinas, diminuição do teor de aromáticos e aumento do teor de asfaltenos.

Pinto (2014) evidencia que a composição química do asfalto não influencia apenas no comportamento físico e mecânico das misturas asfálticas, mas também no processo de incorporação de agentes modificadores.

## **2.2. Ligantes Asfálticos Modificados**

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. No entanto, para condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário o uso de modificadores das propriedades dos asfaltos. (BERNUCCI et al, 2007)

O uso de modificadores para melhorar as propriedades reológicas de um CAP e conseqüentemente de misturas asfálticas tem aumentado. Os modificadores atuam nas propriedades físicas e reológicas dos ligantes. São adicionados visando melhorar o desempenho funcional dos pavimentos, reduzindo as variações de suas propriedades em relação às temperaturas de serviço a fim de evitar grandes alterações no comportamento mecânico do pavimento em função das solicitações de tráfego, tais como:

- Aumento do ponto de amolecimento e da elasticidade;
- Melhoria das características adesivas e coesivas;
- Maior resistência ao envelhecimento, à deformação permanente e às trincas de fadiga/térmicas.

Tendo em vista as melhorias ocasionadas pela modificação do asfalto, é possível a execução de ligantes asfálticos diferentes do CAP sem perder em durabilidade, que possuam características mais apropriadas para rodovias de alto tráfego, que permitam inclusive mais segurança e conforto ao usuário da via, viabilizando projetos específicos para as necessidades de cada pavimento. (A. JUNIOR, 2012).

### **2.3. Ligantes Asfálticos Modificados Por Polímeros**

Dentre os modificadores mais utilizados na pavimentação, destaca-se o uso de polímeros. Bernucci et al. (2007) define polímeros como macromoléculas sintéticas, estruturalmente simples, constituídas de unidades estruturais repetidas em sua longa cadeia, denominadas monômeros. Os homopolímeros são constituídos por apenas um monômero, e os copolímeros são os que apresentam pelo menos dois monômeros em sua estrutura.

O comportamento do polímero sintético depende dos materiais de partida (monômeros), do tipo de reação empregado para sua obtenção e da técnica de preparação. Os tipos de reação empregados são:

- Poliadição, por exemplo, SBR (borracha estireno-butadieno) e EVA (etileno-acetato de vinila);
- Policondensação, por exemplo, ER e PET;
- Modificação química de outro polímero, por exemplo, SBS (estireno-butadieno-estireno).

Quanto ao seu comportamento frente às variações térmicas, os polímeros são classificados em categorias:

- termorrígidos: são aqueles que não se fundem, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Apresentam cadeias moleculares que formam uma rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade térmica. Por exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;



- termoplásticos: são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporados aos asfaltos a alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;
- elastômeros: são aqueles que, quando aquecidos, se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas. Por exemplo: SBR
- elastômeros termoplásticos: são aqueles que, a baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém quando a temperatura aumenta passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS e EVA.

Os Asfaltos Modificados por Polímeros (AMP) começaram a ser utilizados no Brasil na década de 90. Em 1999, foi criada a Especificação Técnica para Asfalto Modificado por Polímero – DNER EM 396/99. Atualmente, todos os asfaltos modificados por polímero comercializados no Brasil devem seguir as especificações impostas pela ANP (Agência Nacional, de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) ou pelo DNIT (Norma 129/2010 -EM). (A. JUNIOR, 2012).

No tocante as vantagens do CAP modificado com polímeros, Gusmão (2009) descreve que essas vantagens podem ser vistas e agrupadas da seguinte forma:

- em relação às misturas asfálticas densas: maior resistência a ocorrência de deformações permanentes, aumento da vida de fadiga, redução da espessura da camada do pavimento, melhor coesão e adesão frente à ação da água e do tráfego;
- em relação as camadas drenantes: melhor resistência à ação da água e ao arrancamento do agregado por ação do tráfego; aumento da capacidade de drenagem superficial do pavimento;
- em camadas de absorção de tensões: manutenção das propriedades elásticas sob maior faixa de temperatura, que o asfalto convencional; minimização da reflexão de trincas do pavimento antigo para o novo, aumento da ligação entre as camadas asfálticas e maior absorção das tensões, permitindo ao projetista diminuir a espessura das camadas asfálticas.

Para Bernucci et al. (2007), o uso de AMP pode reduzir a frequência de manutenções e aumentar a vida útil de pavimentos em locais de difícil acesso ou onde houver um custo muito elevado de interrupção do tráfego para reparos, além de beneficiar também locais de tráfego canalizado. Conquanto, os autores citam também que para que haja viabilidade técnica e econômica com a modificação, é necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização, misture-se adequadamente com o asfalto, melhore as características de fluidez do asfalto a altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para a mistura e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço a baixas temperaturas. Ainda trata a necessidade de que mantenha suas propriedades durante a estocagem, aplicação e em serviço. Sendo o mesmo, processado por equipamentos convencionais e podendo ser aplicado com uma temperatura não muito diferenciada.

Zhu et al. (2014) ressaltam que a adição de polímeros ao CAP de petróleo pode ter, além das vantagens, várias limitações. As principais limitações são: o alto custo, a alta sensibilidade à temperatura de alguns polímeros modificadores, baixa resistência ao envelhecimento, problemas de separação de fase durante o armazenamento (estocagem) que geralmente são ocasionados por falta de compatibilidade entre o polímero e o CAP e, ainda, melhoria limitada da elasticidade à baixas temperaturas.

Outra limitação da adição de polímeros ao asfalto está diretamente relacionada à quantidade de polímeros a adicionar, pois os polímeros tendem a promover o aumento da viscosidade do CAP e apesar do efeito positivo esse aumento de viscosidade poderá comprometer a trabalhabilidade da mistura, tornando o processo construtivo mais complexo (SOBREIRO, 2014).

Vasudevan et al. (2012) atribuem o bom desempenho de misturas asfálticas modificadas com polímero à estrutura tridimensional resultante das reações químicas entre as moléculas desses materiais e os constituintes do asfalto.

Polímeros são hidrocarbonetos de cadeia longa, já o asfalto é uma mistura complexa de maltenos e asfaltenos, também com hidrocarbonetos de

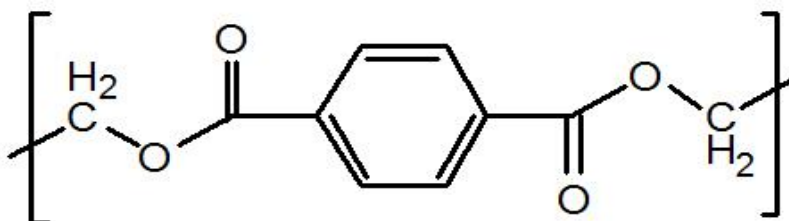
cadeia longa. Ao se misturarem parte do asfalto se difunde através do polímero promovendo uma forte ligação com o agregado, o que dificulta a remoção do ligante asfáltico. Esse processo se deve pelo fato de que o polímero, além de preencher os polos dos agregados, liga-se conjuntamente com estes, formam uma forte ligação orgânica com o asfalto.

#### 2.4. Politereftalato De Etileno (PET)

Conforme Romão et al. (2009), atualmente, o PET é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo. As aplicações do PET são: fibras têxteis, embalagens processadas por injeção-sopro, filmes biorientados e polímeros de engenharia. O sucesso deste material deve-se à sua excelente relação entre as propriedades mecânicas, térmicas e o custo de produção. Os autores ainda citam que no Brasil, a principal aplicação do PET é na indústria de embalagens. O segmento do mercado nacional da indústria alimentícia e de embalagens corresponde a quase 1/3 (um terço) do mercado brasileiro de polímeros envolvendo diretamente o uso do PET para embalagens de bebidas carbonatadas.

O PET é uma resina de polímero termoplástico utilizado na produção de garrafas de bebidas, materiais reciclados, fibras sintéticas, alguns recipientes de plástico, entre outras aplicações. Sua estrutura química está indicada na Figura 2.

**Figura 2** - Estrutura Química do Politereftalato de Etileno



Fonte: Conselho Regional de Química (CRQ) – IV Região (2011)

O politereftalato de etileno (PET) é um polímero de cadeia longa, pertencente à família genérica poliésteres, e são formados a partir dos intermediários, ácido tereftálico (TPA) e do etilenoglicol (EG), que são ambos derivados de matérias-primas de petróleo. Em sua forma mais pura, é um material vítreo, amorfo, e que sob a influência da modificação direta como aditivos, desenvolvem cristalinidade. O alto preço de polímeros in natura e a mão de obra barata se constituem em aspectos potencializadores da reciclagem desses resíduos de plásticos (SILVA, 2018).

O politereftalato de etileno (PET) é imensamente utilizado por possuir excelentes propriedades. Entre as fibras sintéticas, o PET apresenta uma estrutura cristalina compacta com boas propriedades mecânicas, dielétricas e ópticas, resistentes a vários solventes, ácidos e meios alcalinos. Pode-se destacar, dentre seus vários usos industriais, a sua utilização na área automotiva, eletro-eletrônica e de embalagens para gêneros alimentícios. No tocante à sua aplicação como embalagens, por serem produtos de curta vida útil e de longo tempo de degradação esse material tem se apresentado em grande volume dentre os resíduos sólidos urbanos, o que o tem tornado um dos grandes vilões ambientais, despertando grande interesse no reaproveitamento desse material a partir de processos de reciclagem.

Sabe-se, porém, que não existem muitas hipóteses de reutilização ou reciclagem do já citado plastômero, tendo em vista que ele não pode ser reutilizado na mesma cadeia produtiva, haja vista que estes recipientes absorvem contaminantes que podem ser liberados e conseqüentemente agirem nocivamente nos produtos e, principalmente, alimentos quando estes são encapsulados. As impurezas contidas no PET micronizado (Figura 3), pós consumo, promovem a cristalização do polímero durante o arrefecimento, aumentando a rigidez do produto.

**Figura 3 - PET Micronizado**



No Brasil, de acordo com a portaria nº 987 de 1998 da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, apenas é possível a utilização de PET pós-consumo em embalagens multicamadas destinadas ao acondicionamento de bebidas carbonatadas não alcoólicas.

#### **2.4.1. Utilização do PET na Construção Civil**

A respeito da construção civil, sabe-se que a mesma é responsável por impactos significativos, sendo necessária a criação de novas formas de enfrentar os desafios gerados por suas etapas construtivas. Diversos estudos trazem o PET como solução sustentável e viável para a fabricação de materiais de construção.

Um tipo de material desenvolvido nos Laboratórios do Centro Federal de Tecnologia do Paraná/Cefet-PR, por exemplo, são os blocos intertravados ISOPET, confeccionados em concreto leve com EPS (isopor) reciclado e produzido a partir de garrafas plásticas recicladas. (AGUIAR,2004)

Guimarães e Tubino (2004), propõem que os rejeitos de garrafas PET, pneu e casca de arroz sejam reutilizados como adição em argamassa de

enchimento de painéis tipo sanduíche para paredes externas de casa de madeira visando obter melhor desempenho térmico.

Almeida et. al (2004), por sua vez, propõe a utilização de um resíduo conhecido como areia de PET que devido à sua granulometria (2,4 mm) ainda não tem um fim específico a não ser o aterro, com substituição à areia convencional, para preparo de concretos convencionais, observando-se a trabalhabilidade, a densidade e a resistência à compressão.

Nota-se, dessa forma, uma pressão crescente sobre a construção civil para inovação e criação de novas tecnologias que propiciem e assegurem a preservação ambiental. Nesse contexto, como visto, o PET tem se mostrado uma alternativa viável e eficaz para o desenvolvimento de novas práticas construtivas.

#### **2.4.2. Ligantes Asfálticos Modificados com PET**

O asfalto, por si só, gera impactos ao homem e ao meio ambiente, desde a extração do material até a sua utilização, em função da sua composição química e física. Nesse contexto, considerando-se a magnitude e a importância do modal rodoviário, observa-se a necessidade de aliar esses dois fatores: viabilidade ambiental e qualidade do pavimento. Uma proposta que possibilita esse resultado é a utilização de polímeros reciclados como modificadores do CAP, tais como o politereftalato de etileno (PET).

Sendo inviável, então, a reutilização dos recipientes tipo PET na mesma cadeia produtiva de embalagens e claramente necessária a busca por novos meios para sua reutilização e aplicação, favorecendo assim o meio ambiente. Percebe-se, por conseguinte, que é extremamente viável a sua utilização em pavimento não causando grandes danos a natureza e seus habitantes e ainda diminuindo os custos na produção do mesmo, tendo em vista a fácil obtenção da matéria prima, sua vasta existência, barateando assim o produto final e melhorando ainda a sua qualidade, sendo um duplo benefício caracterizador

dos futuros empenhos para sua aplicação, haja vista a capacidade do polímero termoplástico em atuar eficazmente como modificante do ligante asfalto.

Para Cardoso (2012), verifica-se uma característica essencial que contribui para melhorar as propriedades do PET em relação a seus efeitos sob o asfalto, tal fator corresponde ao ajuste sofrido pela sua estrutura molecular. Em referência ao comportamento do PET na atuação como modificador nas misturas asfálticas, em moldes transparentes e amorfos, quando fundido e arrefecido rapidamente, o polímero em questão mantém o estado alongado. Em seguida, a sua microestrutura é enrijecida, com sua cadeia polimérica restante intacta. Uma vez definida essa fase de estado enrijecida, o material torna-se extremamente resistente, conferindo, assim, propriedades melhoradas aos asfaltos.

Ainda em referência a Cardoso (2012), a forma do PET, quando aquecido a uma temperatura de 72 °C, passa por um processo lento de cristalização, o qual torna o material opaco, mais rígido e menos flexível. Essa fase, que confere melhores propriedades de atuação no pavimento, é conhecida como o PET cristalino. Ao final do processo, adquirindo a forma descrita, o politereftalato de etileno se torna capaz de resistir a temperaturas mais elevadas, e pode ser adicionado ao ligante asfáltico, promovendo maiores ganhos de resistência a deformações permanentes.

Em sua pesquisa, Ahmadinia et. al (2012) obtiveram melhorias no desempenho das misturas em relação à deformação permanente, verificado através de simuladores de tráfego em placas moldadas. Segundo esses autores, esse fenômeno está associado a um aumento na rigidez das misturas, ocasionado pelas propriedades semicristalinas do PET. Já em relação ao escorrimento do ligante, importa ressaltar que os resíduos de PET acarretam um crescimento na área superficial que absorve o ligante em excesso, ao permanecerem na forma de cristais, acarretando uma considerável redução do escorrimento do ligante.

Ao contrário dos autores acima, Moghaddam et. al (2012) afirmam que o PET pode tornar as misturas mais flexíveis em portanto, mais deformáveis sob aplicação de carga. Os autores também verificam que a adição de PET

proporcionou uma melhora nas propriedades elásticas das misturas, resultando no aumento da vida de fadiga por absorver parte da energia oriunda de cargas.

Mohammed et al. (2014) ao analisarem o comportamento de misturas asfálticas, formadas por asfaltos modificados com partículas finas de PET, observaram e concluíram ao final que a polimerização do asfalto com PET aumentou inegavelmente a rigidez da mistura, e melhorou entre agregados e ligantes a adesão destes, diminuindo os danos causados pela umidade. Importante salientar que outra grande análise realizada pelos autores supracitados foi em relação a durabilidade das tão mencionadas misturas asfálticas. Concluindo, mais uma vez, que houve um resultado positivo quando da polimerização do asfalto com PET, tendo como explicação a melhoria das propriedades de adesividade agregado-ligante resultado desta, como já exposto.

Contudo, após a exposição de tais análises e percepção clara das vantagens proporcionada pela polimerização do ligante asfáltico, importa salientar que existem dificuldades ao atuar na realização de tal procedimento, quando observa-se que há uma tendência de separação de fases em elevadas temperaturas por consequência da pouca compatibilidade existente entre o polímero e o ligante asfáltico. Mohammed et al (2014) afirmam que para garantir uma significativa homogeneidade e assim atender aos requisitos de estabilidade à estocagem e ductibilidade, deva haver um acréscimo máximo de 4% de PET, para produção do asfalto polímero, em relação ao peso do ligante.

## **2.5. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR**

Conforme cita Fernandes (2007), a espectroscopia vibracional no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) pode ser considerada como uma poderosa ferramenta para a determinação de grupos funcionais e para os estudos de conformação e estrutura de macromoléculas.



Para Medeiros (2009), a espectroscopia infravermelha moderna é uma versátil ferramenta para ser aplicada na determinação qualitativa e quantitativa de espécies moleculares de todos os tipos.

De acordo com Pereira (2015), um espectrômetro comum é composto por: uma fonte de radiação infravermelha; um aparelho ótico que analisa o feixe de radiação e um detector.

A referida técnica é uma ferramenta útil para o estudo de grupamentos característicos do ligante asfáltico. Segundo Fernandes (2007), ela permite a obtenção do espectro vibracional completo da molécula, estuda a interação da radiação eletromagnética na região do infravermelho com a matéria, estudando a transição das vibrações normais moleculares.

Os ligantes asfálticos apresentaram mudanças nas suas características físicas e químicas quando submetidos a processos termo-oxidativos causados pela perda de voláteis ou espécies de baixo peso molecular, além da formação de ligações de hidrogênio decorrentes do processo degradativo. (CAVALCANTE, 2016).

Dessa forma, vários pesquisadores utilizaram a técnica de infravermelho para mostrar que compostos carboxílicos são produtos decorrentes da oxidação de ligantes asfálticos, embora existam controvérsias sobre os grupos funcionais predominantes (cetonas, anidridos, ésteres ou ácidos carboxílicos). (FERNANDES, 2007).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Materiais**

Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Ligante convencional: O ligante foi obtido da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A). Será utilizado o CAP 50/70.

- Ligante modificado: CAP 55/75 SBS, fornecido pelo Empresa JBR, localizada no estado de Pernambuco.
- Politereftalato de etileno: O Politereftalato de etileno na forma triturada, fornecido pela empresa DEPET, localizada no município de Campina Grande-PB.

### 3.2. Métodos

A metodologia utilizada para realização desta pesquisa encontra-se descrita a seguir:

#### Mistura do PET ao Ligante

A mistura do ligante asfáltico com o PET será realizada em um misturador mecânico FISATOM, modelo 72 (Figura 4). O processo de modificação foi realizado a rotações de 2000 rpm, durante 30 minutos, sendo o ligante asfáltico mantido a uma temperatura entre 160°C e 165°C.

**Figura 4** - Ilustração do Misturado mecânico- LEP/DEC/UFCG



### RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

O procedimento RTFO que segue a norma ASTM D 2872-97 avalia o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico em movimento. Uma fina película de asfalto de 35g é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163°C por 85 minutos, com injeção de ar. Os efeitos do calor e do ar são determinados a partir de alterações nos valores das análises físicas como medidos antes e depois do tratamento no forno. O equipamento encontra-se ilustrado na figura 5.

O procedimento possibilita a identificação de mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150 °C, verificadas por variações nas propriedades de consistência. Também pode ser usado para se determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade ou oxidação do asfalto.

**Figura 5-** Ilustração do Envelhecimento a Curto Prazo - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.



### *Caracterização física do ligante asfáltico de petróleo*

#### Penetração

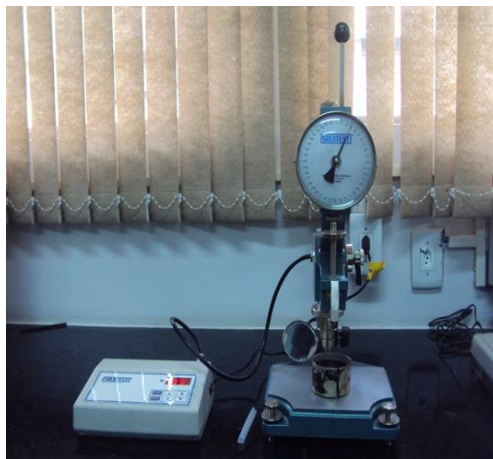
O ensaio de penetração determina a consistência do ligante asfáltico através da medida da profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100 g) penetra verticalmente numa amostra de ligante,

por 5 segundos, à temperatura de 25°C. O procedimento é regido pela norma DNIT-ME 155/2010.

Inicialmente a amostra foi levada à estufa para aquecimento, até obter uma consistência fluida; foi colocada em um recipiente cilíndrico, metálico e de base plana, cujos diâmetro e altura interna são respectivamente 55 e 35 mm, adequados às amostras com penetração até 200 décimos de milímetro; foi resfriada à temperatura ambiente e, em seguida, colocado em banho d'água.

Foram realizadas 5 determinações para cada amostra, no penetrômetro mostrado na Figura 6, a partir das quais obteve-se uma média que representa a penetração propriamente dita. A partir das médias de penetrações obtidas antes e após o envelhecimento a curto prazo, foi possível determinar também a Penetração Retida do ligante, visando verificar a sensibilidade do material ao envelhecimento à curto prazo.

**Figura 6-** Ilustração do Penetrômetro - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.



### Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento é a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido e atinge a placa inferior da aparelhagem. Este ensaio, também conhecido por Anel e Bola, é regido pela norma DNIT-ME 131/2010.

Como são utilizadas duas bolas no procedimento, as quais são envolvidas pelo asfalto a partir do momento em que este amolece e começa a escoar, resulta na medida de duas temperaturas que não podem ser discrepantes entre si em mais de 1° C.

O ponto de amolecimento foi então a média das temperaturas lidas no termômetro assim que as bolas atingiram a placa de referência do ensaio. O equipamento de ponto de amolecimento encontra-se ilustrado na Figura 7.

Com os resultados de penetração e ponto de amolecimento, será possível obter o Índice de Susceptibilidade Térmica, que indica a sensibilidade da consistência dos ligantes à variação de temperatura (BERNUCCI et al, 2007).

**Figura 7**-Ilustração do Ensaio de Ponto de Amolecimento - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.

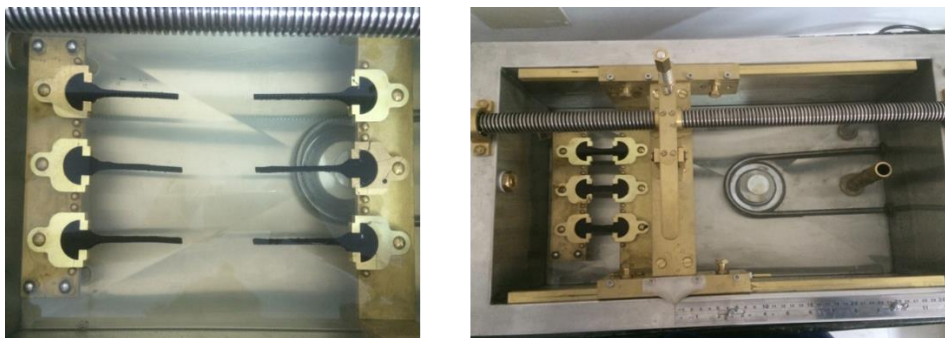


### Recuperação elástica

Recuperação elástica é o ensaio que determina a medida de capacidade de retorno do material asfáltico, após a interrupção da tração mecânica especificada. Três amostras de CAP devem ser despejadas em moldes apropriados e deixar esfriar a temperatura ambiente por 30 minutos, após esse tempo, deve-se submeter o conjunto ao banho d'água por mais 30 minutos. Deve-se então deformar parte do molde e inseri-lo novamente na água por 85 minutos. Após estes processos deve-se encaixar os orifícios do molde em cada

extremidade e acionar o ductilômetro, até que o corpo de prova se alongue  $(20,0 \pm 0,5)$  cm. Para-se a tração, desligando o equipamento. Imediatamente após, o material asfáltico distendido deve ser cortado no centro, com auxílio da tesoura. Deixar o material no ductilômetro em repouso por 60 min, mantendo a temperatura constante. Em seguida, acionar o ductilômetro em sentido contrário, até que as duas extremidades do corpo-de-prova encostem uma na outra, quando, então, é feita a leitura na escala do equipamento, em centímetros. Salvo indicação em contrário, o ensaio deve ser realizado a  $(25,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ , com alongamento de 20 cm e velocidade de  $(5,00 \pm 0,25)$  cm /min. Esse procedimento está exposto a figura 8 abaixo.

**Figura 8-** Ilustração do Ensaio de Recuperação Elástica - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.



### Viscosidade Rotacional

Uma medida importante na caracterização dos CAPs puros e modificados é a viscosidade, pois contém informações sobre processamento, mistura e lançamento do CAP, incluindo utilização nos serviços de pavimentação. O ensaio foi realizado em viscosímetro da marca Brookfield, modelo DVII+ com controlador de temperatura THERMOSEL (Figura 9). O ensaio tem como finalidade determinar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos convencionais e modificados durante o manuseio e a usinagem da mistura asfáltica a altas temperaturas.

O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 15184/2007 considerando as temperaturas de 135, 150 e 177°C e velocidades de 20, 50 e 100 rpm, respectivamente.

**Figura 9**-Ilustração do Viscosímetro Rotacional - Laboratório de Engenharia de Pavimentos LEP/DEC/UFCG.



### *Caracterização química do ligante asfáltico*

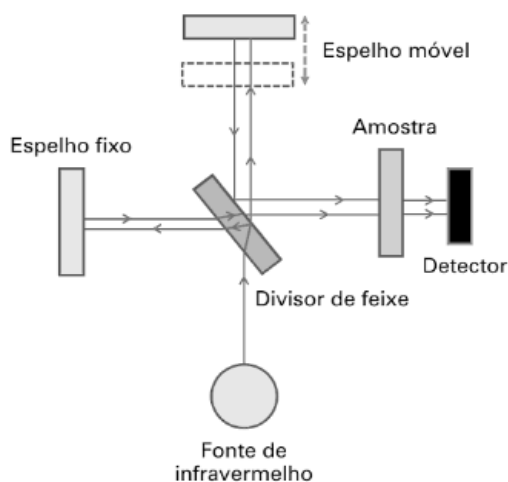
#### Ensaio Químico – Fourier Transform Infrared (FTIR)

O FTIR é um ensaio importante na determinação dos grupos funcionais presentes em diversos materiais, assim como dos compostos resultantes do processo de oxidação dos ligantes. As amostras de politereftalato de etileno e de ligantes foram analisadas por espectroscopia na região do infravermelho médio com a utilização de um espectrômetro Pelkin Elmer Precisely, modelo Spectrum 400 Series, ilustrado na Figura 10, e um Nicolet, modelo iS10, respectivamente, cujo esquema de funcionamento baseado na refletância encontra-se ilustrado na Figura 11.

**Figura 10** - Equipamento FTIR (modelo Spectrum 400 Series).



**Figura 11**-Esquema de funcionamento de um espectrômetro de infravermelho com transformada de Fourier



**FONTE:** Dias et al., 2016.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados expostos adiante apresentarão o que foi obtido nos ensaios realizados para caracterização física e química do ligante puro e modificado com o Politereftalato de Etileno, nas condições antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO).

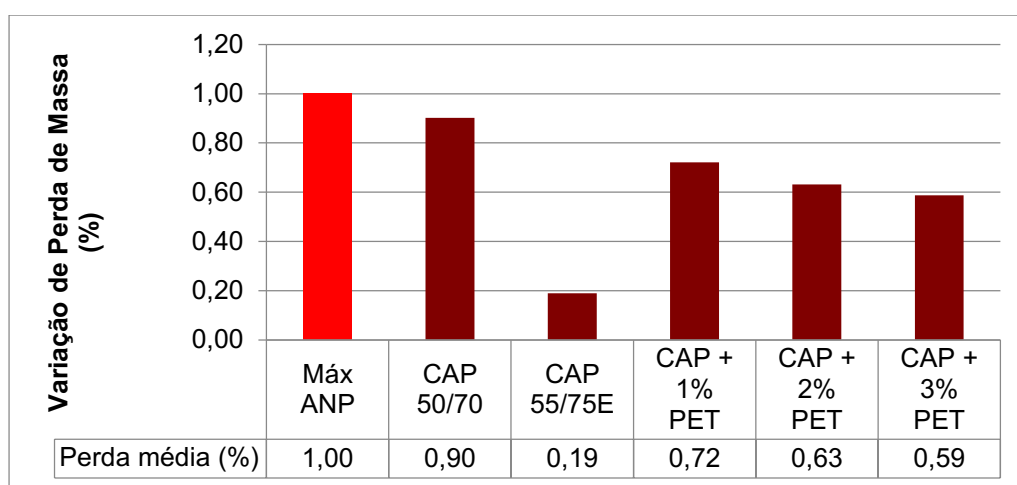
### 4.1 Caracterização Física



#### 4.1.1 Perda de massa

Após o RTFO obteve-se uma perda de massa para os três teores submetidos ao envelhecimento, assim como para o ligante puro e CAP 55/75. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 12, pela qual observa-se que a adição do PET como agente modificador resultou em uma perda de massa inferior à do ligante puro e superior à do CAP 55/75.

**Figura 12 – Variação da perda de massa**

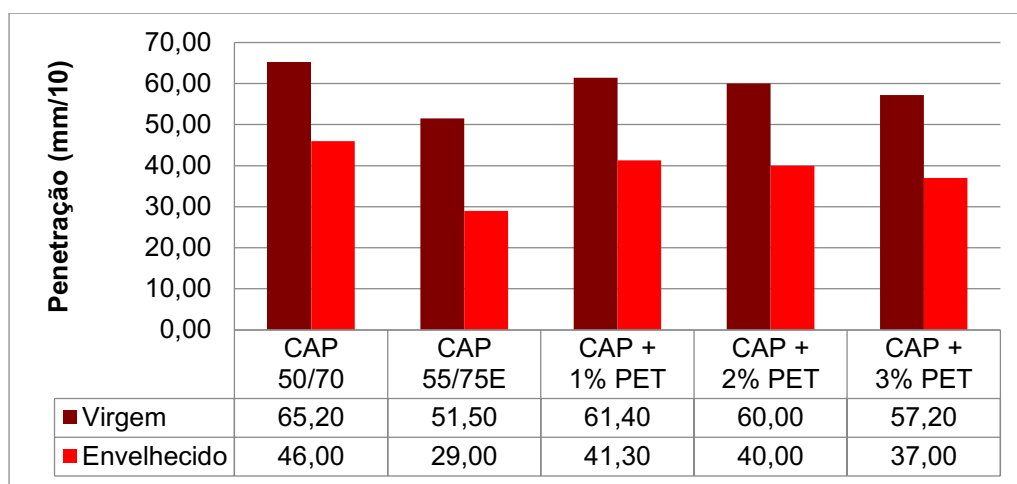


No tocante às amostras modificadas, ao passo que foram aumentados os teores de PET, estas mostraram menor tendência à perda de massa, apresentando uma variação de 0,72%, para o ligante com o teor de 1% de PET, a 0,59%, para o ligante com o teor de 3% de PET, estando, assim, dentro do prescrito pela Resolução N° 32 da ANP, a qual dita que, para o CAP 50/70 modificado com polímeros, a variação da perda de massa não deve ultrapassar 1,0%. Observando-se este fato pode-se notar a existência da propriedade antioxidante do Politereftalato de Etileno, que impede que o ligante se oxide em altas temperaturas, ou seja, impede a evaporação de componentes voláteis da composição do ligante asfáltico, responsáveis pela perda de massa.

#### 4.1.2 Ensaio de Penetração

A Figura 13 ilustra as médias dos valores de penetração obtidas, à temperatura ambiente de 25°C, para o CAP puro e modificado com os três teores em condições antes e após o envelhecimento, bem como para o CAP 55/75E.

**Figura 13 - Ensaio de penetração**



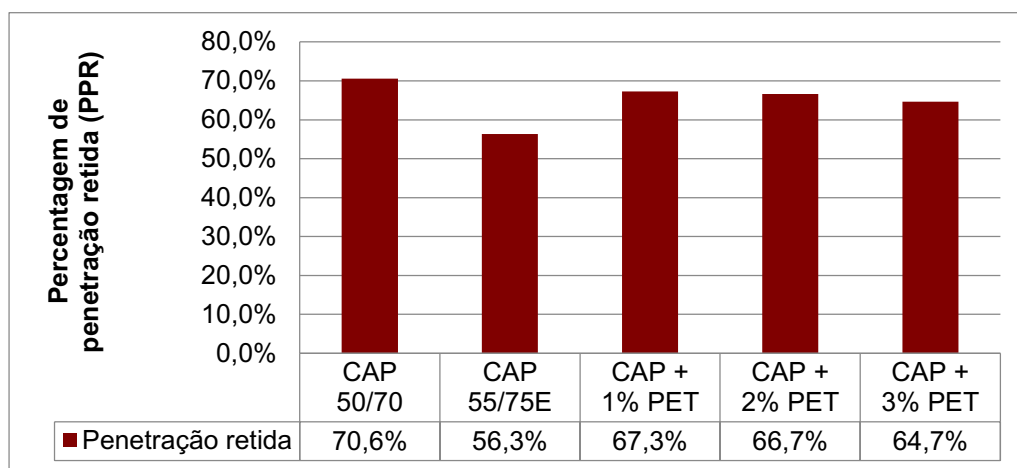
Nota-se que o ligante modificado, em todos os teores, apresenta uma diminuição nos valores de penetração quando comparado ao ligante puro e um aumento se os mesmos forem confrontados com os valores obtidos para o CAP 55/75. Outro fator importante a se destacar é que a penetração no ligante sofre pouca variação com o acréscimo de PET na composição, fato este constatado que a penetração do ligante modificado com 1% de PET, no valor de 61,40 décimos de milímetro, é 7% maior que a penetração do ligante modificado com 3% de PET.

Percebe-se que, à medida que é aumentado o teor de PET no ligante, a penetração sofre uma sutil redução, indicando que o agente modificador proporciona uma maior rigidez ao ligante. Logo, dentre os resultados para o CAP com a adição de PET, foi constatado que a maior penetração ocorre com a presença de 1% do polímero na mistura.

No tocante aos resultados após o envelhecimento a curto prazo, as amostras de CAP puro, CAP modificado com PET e CAP 55/75 indicaram um aumento na rigidez, conforme esperado, obtendo uma diminuição nos valores de penetração. Isto ocorre pelo fato de que o procedimento de envelhecimento resulta na oxidação do ligante, fazendo com que este perca suas propriedades de deformabilidade, tornando-o mais viscoso e, assim, mais rígido.

Na Figura 14 encontram-se ilustrados os valores correspondentes às penetrações retidas. A penetração retida é a relação entre a penetração do ligante envelhecido (após RTFO) e do ligante virgem (antes do RTFO). Maiores valores de penetração retida indicam que o ligante se comporta de forma semelhante antes e após o envelhecimento. Observa-se que dentre todos os resultados, o que apresenta a menor penetração retida é o CAP 55/75, com valor de 56,30%, mostrando que este foi o ligante que mais esteve sensível aos efeitos do envelhecimento.

**Figura 14 - Penetrações Retidas**

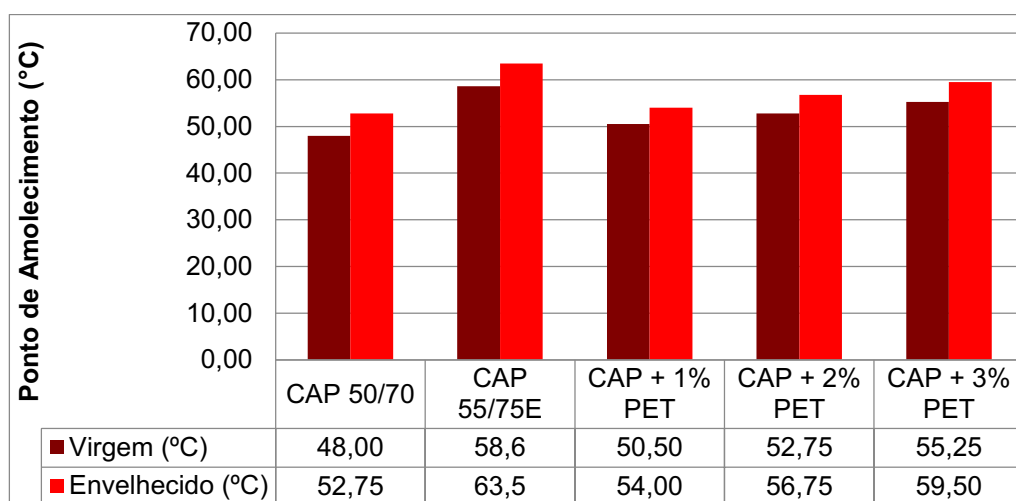


Em relação aos ligantes modificados com PET, observa-se que os valores de penetração retidas ficaram muito próximos, o que indica que, neste quesito, pequenas variações na quantidade de Politereftalato de Etileno na composição da mistura, não provocam mudanças significativas.

### 4.1.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Na Figura 15 estão ilustrados os resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento, para os ligantes modificados com PET, o ligante puro e o CAP 55/75.

**Figura 15-** Gráfico dos resultados do ensaio de ponto de amolecimento



À medida que aumenta o teor de PET na mistura com o ligante, o ponto de amolecimento também aumenta, tendo em vista que a penetração diminuiu com o aumento de PET na composição, ou seja, o ligante se tornou mais rígido.

Pontos de amolecimento mais altos são, de certa forma, interessantes, tendo em vista que em certas regiões do Brasil, por exemplo, os pavimentos asfálticos atingem temperaturas da ordem de 60°C facilmente no verão, tornando ligantes asfálticos com pontos de amolecimento baixos, como o CAP puro, inadequados ao serviço.

Comparando entre si os resultados dos ligantes modificados, observa-se que o ligante com teor de 3% de PET apresentou um acréscimo de 9,5% em comparação ao ligante com teor de 1% de PET, evidenciando as propriedades termoplásticas do Politereftalato de Etileno. Se comparado ao ligante puro, o

acréscimo de ponto de amolecimento do ligante modificado com 3% de PET é da ordem de 15%, o que corresponde a 7,25°C.

O Índice de susceptibilidade térmica (IST) é uma medida da capacidade do ligante de resistir a variações de temperatura. No caso dos asfaltos modificados por polímeros é determinado a partir da penetração em função da temperatura, sendo obtido a partir da Equação 1, descrita pela norma DNIT 095/2006 – EM. Os valores do IST podem variar entre -1,5 e 0,7.

$$IST = \frac{(500)(\log PEN) + (20)(T^{\circ}C)1951}{120(50)(\log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde : (T°C) = Ponto de amolecimento

PEN = Penetração a 25°C, 100g, 5 seg.

Na Tabela 2 encontram-se os resultados referentes aos índices de susceptibilidade térmica das amostras estudadas.

**Tabela 2** - Tabela dos resultados de IST

Amostra	IST	
	Virgem	Envelhecido
<b>CAP 50/70</b>	-1,09	-0,72
<b>CAP 55/75E</b>	0,83	0,45
<b>CAP + 1% PET</b>	-0,58	-0,68
<b>CAP + 2% PET</b>	-0,08	-0,15
<b>CAP + 3% PET</b>	0,37	0,23

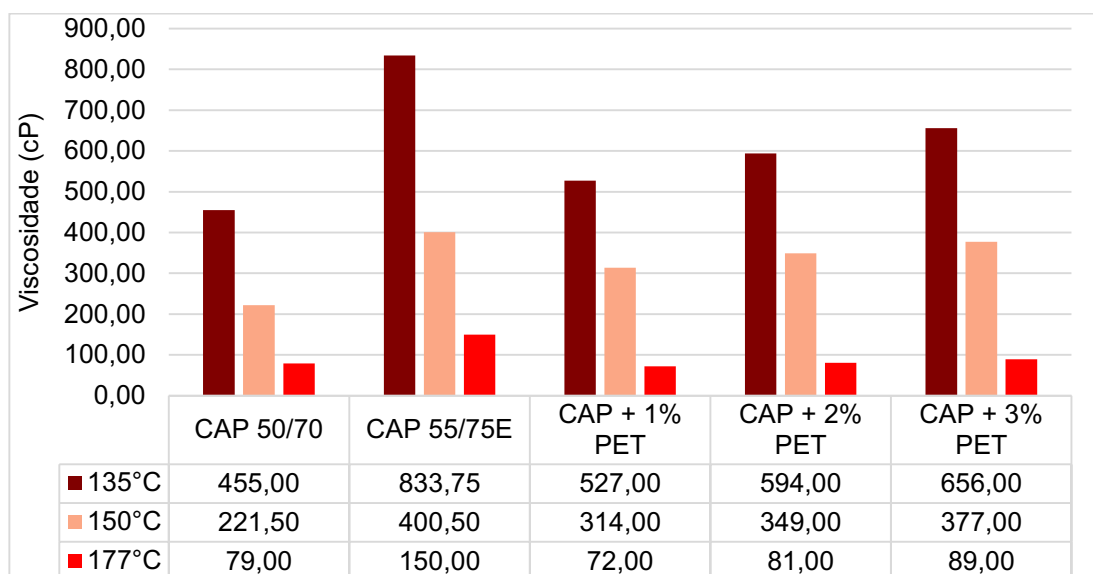
Observa-se que todos os ligantes estudados estão dentro do intervalo prescrito por norma. O CAP puro, com os menores valores de IST tanto antes como após o envelhecimento a curto prazo, mostra-se muito sensível à mudanças de temperaturas (valores próximos de -1,5). As medidas do IST mostram que a adição do PET no ligante diminui sua susceptibilidade, em comparação com o ligante puro, ao passo que é aumentado o teor de PET. Já o CAP 55/75 se mostra pouco sensível a mudanças de temperatura, pois teve

os maiores resultados de IST, sendo valores próximos ao limite de 0,7, comportamento típico de ligantes próximos da oxidação.

#### 4.1.4 Ensaio de Viscosidade Rotacional

Os resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do envelhecimento a curto prazo estão ilustrados na Figura 16 para todos os ligantes estudados, sendo eles o ligante puro, CAP 55/75E e os ligantes modificados com PET nos teores de 1, 2 e 3% de adição.

**Figura 16** - Viscosidade Rotacional dos ligantes estudados antes do envelhecimento

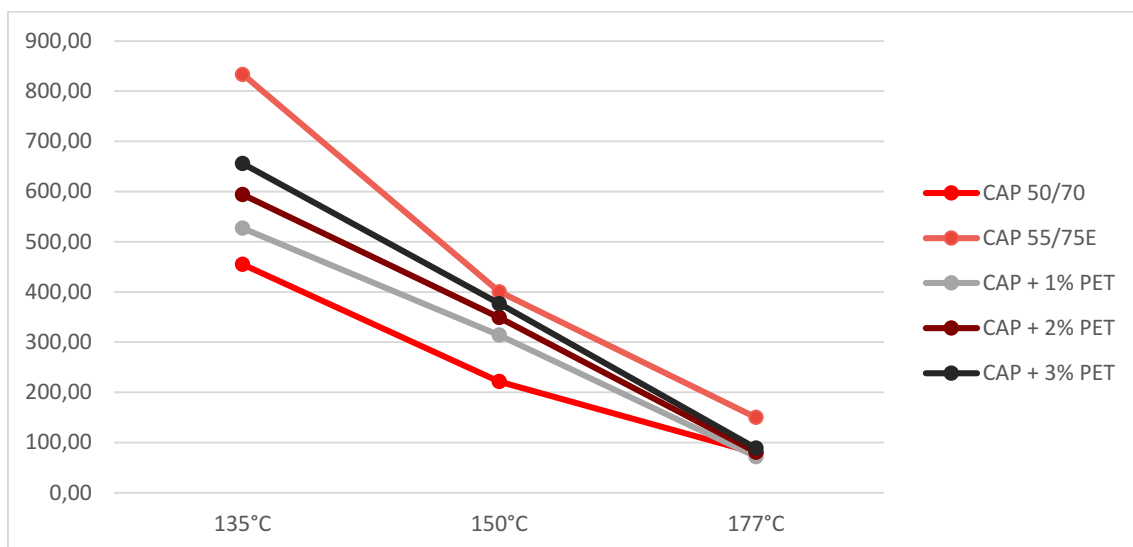


É notório, ao se analisar a figura, que à medida que se aumenta o teor de adição de polímero na composição, aumenta-se também a viscosidade. Este comportamento ocorre em todas as temperaturas observadas e, por exemplo, para a temperatura de 135 °C, ocorre um aumento de viscosidade da ordem de 24% do ligante com 1% de PET para o ligante com 3%, o que indica que a viscosidade é sensivelmente alterada com pequenas variações no percentual de adição do Politereftalato de Etileno. Em comparação ao ligante puro, o aumento foi de 16% de viscosidade para o ligante com 1% de PET. O aumento de viscosidade era esperado e confirma os resultados de Penetração

e de Ponto de amolecimento, onde foi verificado que à medida que aumenta-se o percentual de PET, aumenta-se também a rigidez do ligante, o que está diretamente relacionado à viscosidade.

A Figura 17 ilustra o resultado do ensaio de viscosidade em forma de gráfico de linhas, por onde é possível, graficamente, encontrar as temperaturas de usinagem e compactação (TUC) do ligante asfáltico.

**Figura 17 - Resultados do Ensaio de Viscosidade Rotacional**



Segundo Bernucci (2007), a temperatura de usinagem da mistura asfáltica é compreendida em um intervalo onde a viscosidade do ligante corresponde a  $170 \pm 20$  cP. De forma análoga, a temperatura de compactação da mistura asfáltica corresponde ao intervalo de viscosidade do ligante de  $280 \pm 30$  cP. Desta forma, obtêm-se as TUC dos ligantes asfálticos estudados e os resultados estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3 - Temperaturas de Usinagem e Compactação**

<b>TEMPERATURA DE USINAGEM (°C)</b>					
	<b>CAP 50/70</b>	<b>CAP 55/75E</b>	<b>CAP + 1% PET</b>	<b>CAP + 2% PET</b>	<b>CAP + 3% PET</b>
<b>MÍNIMA</b>	162,00	172,00	163,00	165,00	168,00
<b>MÁXIMA</b>	167,00	177,50	168,00	170,00	172,00
<b>TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO (°C)</b>					
	<b>CAP 50/70</b>	<b>CAP 55/75E</b>	<b>CAP + 1% PET</b>	<b>CAP + 2% PET</b>	<b>CAP + 3% PET</b>
<b>MÍNIMA</b>	146,00	160,00	147,50	149,00	151,00
<b>MÁXIMA</b>	151,00	165,50	152,50	154,00	156,00

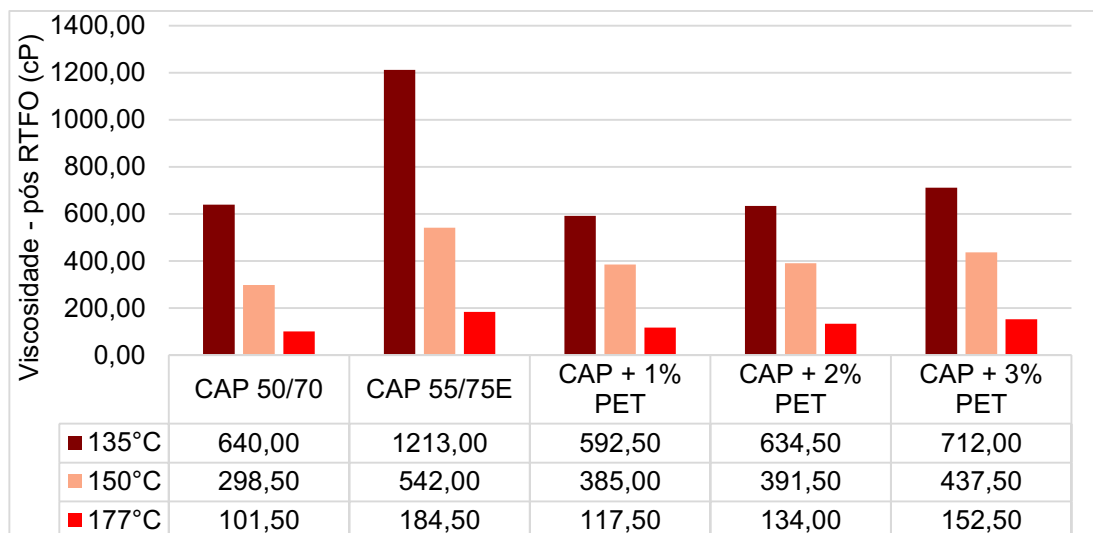
Analisando-se os dados mostrados na Tabela 3 é possível perceber que a temperatura de usinagem dos ligantes modificados com PET aumenta conforme se aumenta o teor de adição, o que era esperado, já que a viscosidade também aumentou devido ao acréscimo do polímero. Por exemplo, o ligante modificado com 3% de PET teve um acréscimo na temperatura de usinagem de 6 °C em comparação ao CAP 50/70, o que corresponde a 4% apenas de aumento. Tal fato é interessante, já que a adição de PET proporciona melhorias no ligante como o aumento da resistência ao envelhecimento, aumento do ponto de amolecimento e incremento discreto da recuperação elástica, como será visto adiante, mas estas melhorias não vêm acompanhadas com um acréscimo elevado de temperatura de usinagem e compactação, evitando que os gastos energéticos para aquecimento e compactação da mistura asfáltica aumentem também.

As temperaturas de compactação também sofreram acréscimo em relação ao ligante puro, mas também seguindo a tendência de aumentar, no máximo, 5°C nas temperaturas mínimas e máximas. Em comparação ao CAP 55/75E, as TUC dos ligantes modificados com PET são inferiores, também seguindo o comportamento da viscosidade, que se apresentou mais elevada para o CAP 55/75.



Na Figura 18 estão ilustrados os resultados do ensaio de viscosidade rotacional do ligante envelhecido, ou seja, após passar pelo RTFO.

**Figura 18** - Viscosidade Rotacional dos ligantes estudados após envelhecimento



Nota-se, analisando os resultados, que o CAP 55/75E obteve uma viscosidade muito mais alta do que a dos ligantes modificados com PET. Por exemplo, comparando-o com o ligante adicionado de 3% de PET, sua viscosidade é 70% maior em baixas temperaturas, como a 135 °C. À medida que a temperatura aumenta, a diferença entre os valores de viscosidade diminui, ficando da ordem de 24% na temperatura de 150 °C e de 21% na temperatura de 177 °C. Este comportamento é explicado pelo fato de que, à medida que a temperatura aumenta, a mobilidade das partículas do polímero na matriz do ligante também aumenta, tornando-o menos viscoso e, em altas temperaturas, os polímeros tendem a se comportar de forma semelhante, já que ambos, PET e SBS, são polímeros termoplásticos.

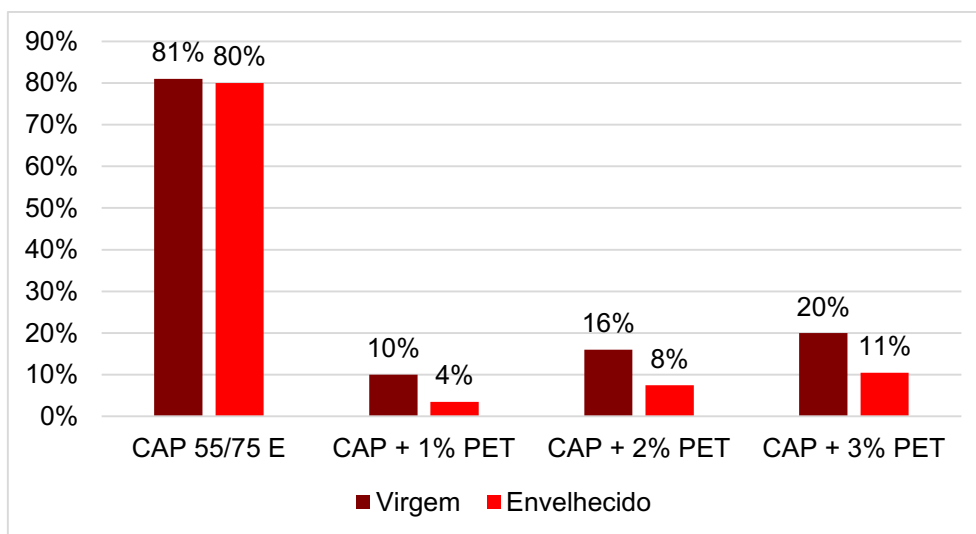
Percebe-se, claramente, que o PET age impedindo a oxidação do ligante, tendo em vista que o CAP 55/75 apresenta um aumento de 45% de sua viscosidade comparando-se os valores antes e após RTFO, enquanto que, no ligante modificado com 3% de PET, à temperatura de 135 °C, este aumento é da casa de 9%. Sendo assim, o Politereftalato de Etileno age aumentando a viscosidade do ligante, mesmo que em baixos teores de adição, porém age

como um antioxidante, impedindo que a viscosidade aumente significativamente após o envelhecimento. Tal propriedade é muito bem vinda, tendo em vista que os ligantes oxidados perdem quase que por completo sua resistência à deformação permanente e à fadiga o que se converte em um pavimento com mais defeitos e, conseqüentemente, menos duradouro.

#### 4.1.5 Ensaio de Recuperação Elástica

O resultado do ensaio de Recuperação Elástica está ilustrado na Figura 19, para o CAP 55/75 e para os ligantes modificados com PET. O CAP 50/70 não apresenta recuperação elástica, sendo assim, não está representado na figura.

**Figura 19** – Gráfico dos Resultados de Recuperação elástica



Como era esperado, o CAP 55/75, modificado com SBS, apresenta recuperação elástica elevada, na ordem de 80%, tanto antes como após o envelhecimento, estando, assim, em conformidade com a resolução N° 32 da ANP, que estipula uma recuperação elástica de no mínimo 75% para ligantes modificados com polímeros. Os ligantes modificados com PET apresentaram recuperação elástica inferior ao CAP 55/75. O CAP com 3% de PET, por exemplo, com o valor de recuperação elástica de 20% antes do

envelhecimento, é três vezes menos elástico que o CAP 55/75. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato do PET não possuir propriedades elásticas, e sim propriedades termoplásticas, desta forma, não aumenta a elasticidade do ligante de forma significativa, apesar de ser um polímero.

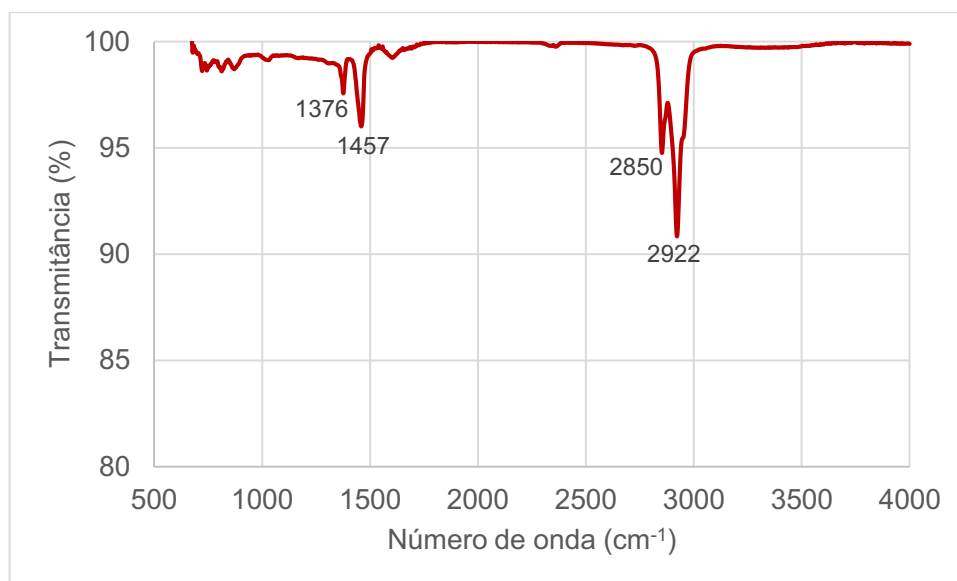
Outro fator importante a ser observado é que a recuperação elástica nos ligantes modificados com PET diminuiu praticamente pela metade após o procedimento de envelhecimento a curto prazo, em todos os teores de adição. No ligante CAP 55/75 este fato não ocorreu, de forma que a recuperação elástica após o envelhecimento é praticamente igual à do ligante virgem.

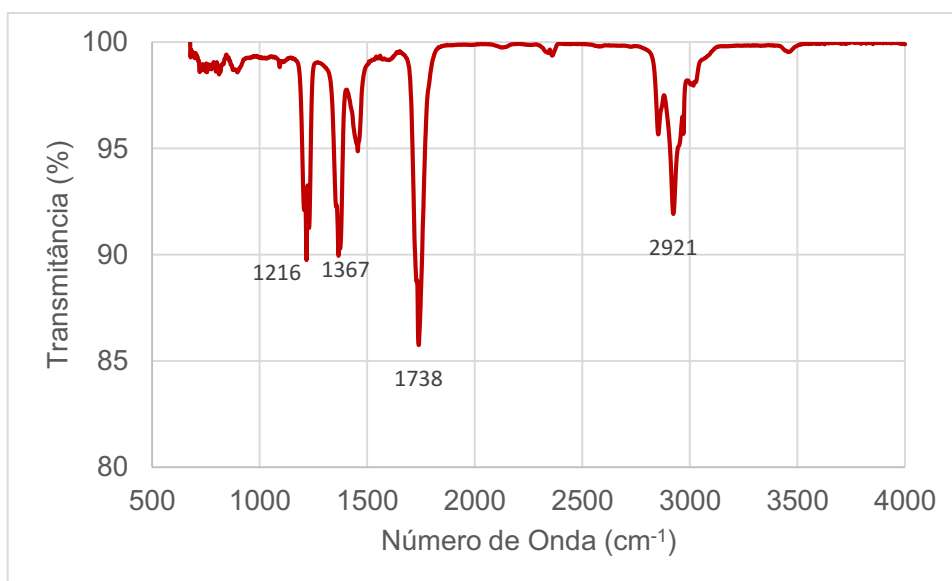
## 4.2. Caracterização Química

### 4.2.1. Espectroscopia no Infravermelho para Transformada de Fourier – FTIR

Nas Figuras 20, 21 e 22, abaixo, encontram-se ilustrados os Espectros referentes aos resultados do FTIR para o CAP puro e adicionado com 2% e 3% de PET.

**Figura 20** - Espectro FTIR para o CAP 50/70



**Figura 21** - Espectro FTIR para o CAP 50/70 modificado com 2% de PET**Figura 22** - Espectro FTIR para CAP 50/70 modificado com 3% de PET

De acordo com as Figuras 20, 21 e 22, verifica-se que o espectro de FTIR obtido para o CAP puro e com adições de 2 e 3% de PET apresentaram as seguintes bandas características: um dublete em 2924 cm<sup>-1</sup> e 2850 cm<sup>-1</sup> indicando vibrações de estiramentos axiais de grupos CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub> (alifático); banda em 1738 cm<sup>-1</sup> indicando vibrações de estiramento do grupo C=O

(carbonila), para o ligante contendo 2% de PET e, bandas em  $1457\text{ cm}^{-1}$  e  $1370\text{ cm}^{-1}$ , referente às deformações axiais simétrica e assimétrica do  $\text{CH}_3$ , respectivamente.

Pode-se verificar que a adição do PET não alterou a composição química presente no ligante, no entanto, os picos encontrados são menores para o CAP com adição de 2 e 3% de PET, assim como a abertura dos poços que também foi reduzida com a incorporação, fato que indica que o PET adicionado ao ligante funciona como um antioxidante.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

### **5.1 Considerações Finais**

Os estudos referentes à adição do Politereftalato de Etileno como componente do ligante asfáltico convencional, mostrou ser esta uma boa forma de reaproveitamento deste rejeito. O CAP 50/70 incorporado com PET se mostrou proveitoso em diversos aspectos físicos.

Observou-se que, em relação ao CAP puro, com o aumento do teor de PET na composição do ligante, aumenta-se, também, o ponto de amolecimento, a viscosidade e diminui-se a penetração. Tais alterações são desejáveis até certo ponto, de modo que um ligante mais rígido pode ser aplicado em serviços mais pesados e em temperaturas de utilização mais elevadas, porém, para se trabalhar com um ligante assim, o gasto energético também é aumentado.

O PET é um polímero termoplástico com propriedades antioxidantes, dessa forma, quando adicionado ao ligante asfáltico convencional mostrou-se eficiente neste quesito. A modificação do ligante puro com Politereftalato de Etileno resultou em ligantes com baixa perda de massa em comparação ao ligante puro, ou seja, o PET agiu impedindo que os voláteis da composição do ligante asfáltico evaporassem.

Comparando ao CAP 55/75 (modificado com SBS), a perda de massa dos ligantes modificados com PET se mostrou maior, isto pode ser explicado pelo fato de o ligante modificado com o SBS ser um produto industrializado, apresentando, assim, menor separação de fases em comparação à modificação com o PET.

Os resultados dos ensaios de viscosidade, ponto de amolecimento e penetração indicam que o CAP 55/75 é mais rígido, ou seja, mais viscoso do que os ligantes modificados com PET, porém, esse fato não vem acompanhado com um acréscimo elevado de temperatura de usinagem e compactação, evitando que os gastos energéticos para aquecimento e compactação da mistura asfáltica aumentem também.

No tocante à recuperação elástica, o CAP 55/75, modificado com SBS, apresenta resultados mais elevados ao ser comparado com o ligante modificado com PET, o que pode ser explicado tanto pela maior separação de fases existente na mistura com o PET, como pelo fato deste ser um polímero termoplástico, não possuindo propriedades elásticas.

Em relação ao ensaio de caracterização química (FTIR), pode-se observar que a adição do PET não modificou a composição do ligante, porém agiu como antioxidante, efeito este que corrobora os resultados referentes à análise da perda de massa e viscosidade rotacional.

Por fim, para a realização de uma melhor análise acerca das propriedades e viabilidade da modificação com o PET, é necessário que os estudos físicos e químicos do ligante possam ser avaliados juntamente às características mecânicas da mistura asfáltica.

## **5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras**

- Estudar os parâmetros reológicos para o ligante modificado com Politereftalato de etileno;
- Realizar a cromatografia para o ligante modificado por adição de Politereftalato de etileno;
- Analisar a viabilidade de utilização do ligante modificado por Politereftalato de etileno para produção de misturas asfálticas.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, E.C.C.; SILVÉRIO, C. D. V.; PEREIRA, L.A.; KANNING, R.C. - *A tecnologia do concreto aliada ao meio ambiente*. CEFET-PR, 2004.
- AHMADINIA, E.; ZARGAR, M.; KARIM, M.R.; ABDELAZIZ, M.; AHMADINIA, E. *Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt*. Elsevier, 2012.
- A. JUNIOR, José Antonio. *Desenvolvimento dos revestimentos asfálticos produzidos com asfaltos modificados por polímeros e borracha de pneus no Brasil*. 7. Ed -São Paulo: Siniceps, 2012.
- Almeida, M.O; Junior, M.J.F; Soncim, S.P; Junior. G. B. A. *Uso de areia de PET na fabricação de concretos*. ICTR,2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15184: Materiais betuminosos- Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional*. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIACAO NACIONAL DE PETROLEO – ANP. N°19. *Especificação brasileira para cimento asfáltico de petróleo – CAP*.
- ASTM D2872-97, *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.
- AZEVEDO, P. N.; FILHO, A. F. S.; *Asfalto Modificado com Polímeros (SBS)*. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2009
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras – Asfaltos, 2007.
- CARDOSO, Y. T. *Desenvolvimento de compósitos de poli (tereftalato de etileno) reciclado com fibras naturais*, In: XXXIV Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.



- CAVALCANTE, F.P. *Efeito Da Adição Dos Óleos De Ricinus Communis E Linus Usitatissimum Nas Propriedades Reológicas Do Cimento Asfáltico De Petróleo Puro E Modificado*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande/UFCG, Campina Grande/PB, 2016.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. *Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial*. Brasília, 2017.
- CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA – IV REGIÃO. *Plásticos*. Disponível em: <[https://www.crq4.org.br/quimicaviva\\_plasticos](https://www.crq4.org.br/quimicaviva_plasticos)>. Acesso em: 23 de outubro de 2018.
- DA SILVA, C. L. A. *Alternativa ao uso do asfalto a quente visando a redução da energia consumida durante sua execução*. Programa de pós-graduação em engenharia de recursos. Manaus, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 396/99 – *Cimento asfáltico modificado por polímero*. Rio de Janeiro, 1999.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 095/2006. *Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material*. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 129/2010. *Cimento Asfáltico Modificado por polímero SBS*. Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 131/2010. *Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola*. Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 155/2010 - *Material asfáltico - determinação da penetração*. Rio de Janeiro, 2010.
- FERNANDES, P. R. N. *Caracterização de ligante asfáltico brasileiro e avaliação da presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos*

- (HPAs). Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza-CE, 2007.
- GUIMARÃES, L. E.; TUBINO, R. M. C.; *Ambientação Técnica de casas de madeira utilizando paredes externas recheadas com argamassa contendo casca de arroz, resíduos de borracha (Pneu) ou garrafa PET triturada*. ICTR,2004.
- ITEN, D. O. V. F. *Estudo das Misturas Asfálticas em CBUQ utilizando Asfalto Convencional e Asfalto Modificado por Polímeros*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2011.
- JÚNIOR, J. M. R. *Estudo das Propriedades Reológicas do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70) Modificado com Polímeros Funcionalizados*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
- LEITE, L. F. M. *Curso básico intensivo de pavimentação urbana (Módulo Básico) ligantes asfálticos*. Rio de Janeiro, 2003.
- MELLO, S. M. *Avaliação das propriedades reológica e mecânica de ligantes e misturas asfálticas irradiadas*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2014.
- MOGHADDAM, T. B. e KARIM, M. R. *Properties of SMA Mixtures Containing Waste Polyethylene Terephthalate*. International Scholarly and Scientific Research & Innovation v. 6, n. 2, p. 1-4, 2012.
- MOHAMMED, D. T. e HUSSEIN, Z. H. *Evaluation of Pyrolysis PET Utilization in Asphalt Binder*. International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, v. 3, p. 114-121, 2014.
- PEREIRA, J. M. da S. *Análise de meteoritos por espectrometria de massa (252Cf-PDMS) e por espectroscopias de Raios X e de infravermelho (XRD, XRF, PIXE, FTIR, Raman)*. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 2015.

- PINTO, M. F. *Estudo de Ligantes e Misturas Asfálticas com Nanomodificadores, Polímeros e Resíduos*. 2014. Dissertação de Mestrado em Ciências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- QUEIROZ, B. O., *Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com politereftalato de etileno (PET)*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- ROMÃO, W., SPINACÉ, M. A. S., DE PAOLI, M-A. *Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Unicamp, Brasil, v. 19, n° 2, p.121-132, 2009.
- SECRETARIA DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria N°987 – *PET multicamada*. 1998.
- SILVA, J. A. A., RODRIGUES, J. K. G., CARVALHO, M. W., LUCENA L. C. F. L., CAVALCANTE, E. H. *Avaliação reológica de ligante modificado com Politereftalato de etileno (PET)*. Revista Matéria, Brasil, v.23, n. 01, 2018.
- SILVA, Raphael H. C. *Asfalto Modificado por Polímero*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Pitágoras, Londrina, 2017.
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO PESADA DO ESTADO DE SÃO PAULO – SINICESP. *Ligantes Asfálticos*. Disponível em: <<http://sinicesp.org.br/materias/2010/bt05a.htm>>. Acesso em: 23 de outubro de 2018.
- SOBREIRO, F.P. *Efeito a adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS*. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- VASUDEVAN, R., SEKAR, A. R. C., SUNDARAKANNAN, B. e VELKENNEDY, R. *A technique to dispose waste plastics in na ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements*. Construction and Building Material, V. 28, p. 311-320, 2012.

ZHU, J.; BIRGISSON, B.; KRINGOS, N.; *Polymer Modification of Bitumen Advances and Challenges*, European Polymer Journal, 2014.