

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA CAROLINA OSTROVSKI
ANDRESSA RAFFLER

**CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO DE ALTO
DESEMPENHO ALTAMENTE MODIFICADO POR POLÍMEROS
(HiMA)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2018

ANA CAROLINA OSTROVSKI
ANDRESSA RAFFLER

**CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO DE ALTO
DESEMPENHO ALTAMENTE MODIFICADO POR POLÍMEROS
(HiMA)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Sede Ecoville, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Adauto José Miranda de Lima.

CURITIBA
2018



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO DE ALTO DESEMPENHO ALTAMENTE MODIFICADO POR POLÍMEROS (HiMA)

Por

**ANA CAROLINA OSTROVSKI
ANDRESSA RAFFLER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado no primeiro semestre de 2018, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Aduino José Miranda de Lima, Dr.
UTFPR

Prof. Arthur Medeiros, Dr.
UTFPR

Prof. Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

UTFPR - Deputado Heitor de Alencar Furtado, 5000- Curitiba - PR Brasil
www.utfpr.edu.br dacoc-ct@utfpr.edu.br telefone DACOC: (041) 3279-4500

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

RESUMO

OSTROVSKI, Ana Carolina; RAFFLER, Andressa. Caracterização do Ligante Asfáltico de Alto Desempenho Altamente Modificado por Polímeros (HiMA). 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Novas tecnologias surgem constantemente no setor da pavimentação, especialmente no que se refere aos ligantes asfálticos modificados por polímeros. O objeto de estudo desta monografia é o ligante altamente modificado por polímeros - HiMA (*Highly Modified Asphalt*), que já é conhecido em países europeus e nos EUA, mas pouco utilizado no Brasil. É possível que a causa dessa baixa utilização seja a falta de divulgação, às restrições tecnológicas e o baixo de conhecimento dos engenheiros de pavimentação locais. Este trabalho teve por objetivo caracterizar o ligante asfáltico HiMA, por meio de ensaios normatizados no Brasil e compará-lo aos ligantes comumente utilizados no país, o CAP convencional 50/70 e o modificado 55/75. Os ensaios selecionados para a caracterização foram os seguintes: Viscosidade *Brookfield*, Penetração, Ponto de Amolecimento, Ponto de Fulgor e Recuperação Elástica, os quais foram realizados no laboratório da empresa E-Vias, Empresa Latino Americana de Consultoria Viária, com o material ensaiado cedido pela empresa Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo. No estudo, o ligante HiMA apresentou resultados superiores aos demais ligantes quanto a viscosidade, penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica, ou seja, espera-se que misturas asfálticas compostas pelo mesmo resultem em pavimentos com melhores condições estruturais, mais resistentes à deformação permanente e à fadiga, dificultando, o aparecimento de defeitos como afundamento por trilha de roda e trincas, e também mantendo as propriedades elastoméricas do asfalto em uma amplitude térmica de -30° a 70° , o que reduz as deformações permanentes em altas temperaturas e elimina o comportamento frágil em baixas temperaturas.

Palavras-chave: Ligante asfáltico. HiMA. Ensaios. Defeitos.

ABSTRACT

OSTROVSKI, Ana Carolina. RAFFLER, Andressa. Characterization of the Highly Modified Asphalt (HiMA). 52f. Graduation Work (Civil Engineering). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

New technologies are constantly arriving in paving area, especially about highly modified asphalt. The object of this study is the highly modified asphalt - HiMA (Highly Modified Asphalt), which is known in European countries and in USA but little used in Brazil. It is possible that the causes of this low use are the lack of divulgation, the technology restrictions and the short knowledge of the local paving engineers. The objective of this study was to characterize the Highly Modified Asphalt – HiMA, through standard Brazilian tests, and compare it to the binders commonly used in Brazil, the conventional CAP 50/70 and the modified CAP 55/75. The selected tests to the characterization were: Viscosity Brookfield, Penetration, Softening Point, Glow Point and Elastic Recovery, which were performed in the lab of the company E-vias, Empresa Latino Americana de Consultoria Viária, with the stuff donated by the company Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo. In the study, the binder HiMA presented superior results than the other binders, concerning viscosity, penetration, softening point, glow point and elastic recovery, in other words, it is expected that asphaltic blend with that binder will generate pavements with better structural conditions, more resistant to permanent deformation and weight, interfering in the emergence of flaws, like wheel trail sinking and cracks, and also maintaining the elastomeric qualities of the asphalt in thermal amplitude of -30° to 70° , what reduces the permanent deformation in high temperatures and eliminates the fragile behavior in low temperatures.

Key-words: asphaltic binders. HiMA. Tests. Flaws.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das vendas de CAP e ADP da Petrobrás no ano de 2010	15
Figura 2 - Efeito do aumento dos teores de polímero	22
Figura 3 - Trinca Isolada Longitudinal	25
Figura 4 - Trinca Interligada Tipo Jacaré.....	25
Figura 5 - Trinca Isolada Transversal.....	26
Figura 6 - Afundamento de Trilha de Roda	28
Figura 7 - Viscosímetro <i>Brookfield</i>	31
Figura 8 - Corpos de Prova – Penetração e Recuperação Elástica	32
Figura 9 - Determinação da Penetração – CAP 50/70	32
Figura 10 - Determinação da Penetração – CAP 55/75	33
Figura 11 - Determinação da Penetração – HIMA.....	33
Figura 12 - Corpo de Prova – Ponto de Amolecimento - CAP 50/70.....	34
Figura 13 - Corpo de Prova – Ponto de Amolecimento - CAP 55/75.....	35
Figura 14 - Corpo de Prova – Determinação do Ponto de Amolecimento HIMA.....	35
Figura 15 - Determinação do Ponto de Amolecimento – Método Anel e Bola.....	36
Figura 16 - Determinação do Ponto de Amolecimento – Método Anel e Bola.....	36
Figura 17 - Determinação do Ponto de Fulgor	37
Figura 18 - Corpo de Prova - Recuperação Elástica – CAP 55/75.....	38
Figura 19 - Corpo de Prova - Recuperação Elástica – HIMA	38
Figura 20 - Ensaio de Recuperação Elástica	39
Figura 21 - Corpos de Prova Ensaçados - Recuperação Elástica.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química do Petróleo em Diversos Países	14
Tabela 2 - Refinarias da Petrobrás.....	15
Tabela 3 - Especificações para CAP – Classificação por Penetração	17
Tabela 4 - Especificações dos CAP Modificados por Polímeros Elastoméricos.....	19
Tabela 5 - Principais Modificadores Poliméricos	20
Tabela 6 - Análise de Variância.....	29
Tabela 7 – Resultados Ensaio Viscosidade <i>Brookfield</i> à 135°C, SP21, 20 RPM.....	40
Tabela 8 -Análise da Variância ANOVA Viscosidade <i>Brookfield</i> à 135°C	41
Tabela 9 - Resultados Ensaio Viscosidade <i>Brookfield</i> à 150°C, SP21, 50 RPM.....	41
Tabela 10 - Análise da Variância ANOVA Viscosidade <i>Brookfield</i> à 150°C	41
Tabela 11 - Resultados Ensaio Viscosidade <i>Brookfield</i> à 177°C, SP21, 100 RPM...	42
Tabela 12 - Análise da Variância ANOVA Viscosidade <i>Brookfield</i> à 177°C	42
Tabela 13 - Resultados Ensaio Penetração à 25°C, 5s, 100g	43
Tabela 14 - Análise da Variância ANOVA Penetração à 25°C, 5s, 100g	43
Tabela 15 - Resultados Ensaio Ponto de Amolecimento	44
Tabela 16 - Análise da Variância ANOVA Ponto de Amolecimento	45
Tabela 17 - Resultados Ensaio Ponto de Fulgor	45
Tabela 18 - Análise da Variância ANOVA Ponto de Fulgor.....	46
Tabela 19 - Resultados Ensaio Recuperação Elástica.....	46
Tabela 20 - Análise da Variância ANOVA Recuperação Elástica	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO GERAL	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3 JUSTIFICATIVA	11
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	13
2.1 PRODUÇÃO DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO - CAP	13
2.2 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO - CAP	16
2.3 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO MODIFICADO POR POLÍMEROS.....	18
2.4 LIGANTE ASFÁLTICO ALTAMENTE MODIFICADO POR POLÍMEROS	20
2.5 DEFEITOS COMUNS AO PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	23
2.5.1 Fadiga.....	24
2.5.2 Deformação Permanente	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 LABORATÓRIO DE CONTROLE TECNOLÓGICO	29
3.2 MATERIAL UTILIZADO.....	29
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	29
3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO LIGANTE ...	30
3.4.1 Determinação da Viscosidade – Viscosímetro <i>Brookfield</i>.....	30
3.4.2 Determinação da Penetração	31
3.4.3 Determinação do Ponto de Amolecimento	34
3.4.4 Determinação do Ponto de Fulgor	37
3.4.5 Determinação da Recuperação Elástica.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 VISCOSIDADE	40
4.2 PENETRAÇÃO.....	43
4.3 PONTO DE AMOLECIMENTO.....	44

4.4 PONTO DE FULGOR.....	45
4.5 RECUPERAÇÃO ELÁSTICA	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, uma das primeiras estradas que se tem ciência é datada do início da década de 1560. Esta ligava São Vicente ao Planalto Piratininga e era chamada de Estrada do Mar. Tratava-se de uma estrada simples, que só permitiu o tráfego de veículos por volta do ano de 1661. Com o tempo, a preocupação com a agilidade dos deslocamentos impulsionou o desenvolvimento de estradas mais modernas. Como um exemplo desse caso, em 1841 D. Pedro II importou conhecimento da Europa, trazendo ao Brasil o engenheiro alemão Keller para interligar o Porto da Estrela à Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro, essa estrada existe até hoje. Alguns anos mais tarde, em 1861, a primeira estrada pavimentada do país foi construída com o auxílio da mão de obra de colonos alemães, em que se utilizou macadame como base de revestimento. Essa tecnologia se popularizou e, no início do século XX, havia cerca de 500 km de estradas pavimentadas em todo o território nacional (DNIT, 2001).

De acordo com Bernucci *et al.*, (2010), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construídas sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima.

O pavimento mais empregado no Brasil consiste no tipo flexível, que possui revestimento asfáltico em sua superfície. Tais revestimentos podem ser aplicados na forma de tratamentos da superfície do pavimento, como é o caso dos Tratamentos Superficiais Duplos (TSD) ou Triplos (TST) – mais comuns em vias com baixo volume de tráfego – ou ainda na forma de camadas compostas por concretos asfálticos, geralmente Concretos Betuminosos Usinados a Quente (CBUQ) ou Pré-Misturados a Frio (PMF) e a Quente (PMQ), destinadas a vias com volumes de tráfego maiores.

O elemento aglutinante (ou ligante) utilizado nos pavimentos flexíveis é conhecido no Brasil pela sigla CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), ou simplesmente “asfalto”. O mesmo material é referenciado como *asphalt binder* ou *binder* nos Estados Unidos e como *bitumen* em países da Europa. O CAP pode ser definido como um ligante que provém basicamente da destilação do petróleo e possui propriedades termoviscoplasticas, sendo impermeável à água e pouco reativo. No entanto, a baixa reatividade química não evita que esse material possa sofrer um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Mesmo com o desenvolvimento de diversas tecnologias, a pavimentação no Brasil ainda peca em muitos aspectos, entre os quais se sobressaem o econômico e o ambiental. Do ponto de vista econômico, o pavimento tem um grande gasto relacionado à reconstrução precoce e ao desperdício de materiais, o qual, por sua vez também representa um problema ambiental, por utilizar de matéria-prima não renovável.

Buscando encontrar uma solução para a execução de pavimentos que durem mais e necessitem de menos matéria-prima, foi desenvolvida a tecnologia HiMA (*Highly Modified Asphalt* ou “asfalto altamente modificado”), a qual permite adicionar um teor maior de polímeros na mistura asfáltica.

1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar o ligante asfáltico altamente modificado por polímeros HiMA (*Highly Modified Asphalt*) através de ensaios de laboratório.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conhecer as propriedades físico-químicas do ligante asfáltico, tais como: viscosidade, penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor e recuperação elástica;
- Comparar os resultados obtidos com os de produtos similares existentes no mercado;
- Identificar as melhorias que o Asfalto Altamente Modificado (HiMA) poderá trazer ao mercado nacional.

1.3 JUSTIFICATIVA

À medida que novos materiais surgem no mercado da pavimentação, faz-se necessário o desenvolvimento de novas formas de controle tecnológico que possam avaliar e selecionar as melhores soluções para cada situação particularmente, no caso de revestimento de pavimentos flexíveis é importante dar a atenção necessária a escolha do ligante asfáltico para que este atenda às necessidades a que é solicitado (KLINSKY *et al.*, 2014 *apud* REIS *et al.*, 2016).

A necessidade do uso de modificadores das propriedades dos asfaltos se faz necessária principalmente em rodovias de tráfego pesado, o qual solicita muito do pavimento e assim diminui sua vida útil consideravelmente (CERATTI e REIS, 2011).

A falta de investimento em infraestrutura viária prejudica a competitividade da economia brasileira, uma vez que isso acarreta gasto elevado com manutenção, desperdício de carga e um aumento no número de acidentes. De acordo com estimativas da Associação Nacional dos Usuários de Transporte (Anut), o país perde US\$5 bilhões por ano com a precariedade dos pavimentos.

Sabendo que é possível dispor de equipamentos de trabalho em campo e de laboratório que podem permitir um melhor conhecimento dos materiais de pavimentação, é inconcebível que as rodovias brasileiras ainda necessitem de manutenções e reconstruções tão precoces e que resultem em tantos gastos desnecessários. Com o auxílio de profissionais de alto nível de conhecimento na área e uma estrutura laboratorial com equipamentos avançados para monitoramento das propriedades mecânicas e de desempenho dos materiais, é possível o desenvolvimento de materiais alternativos para as camadas de pavimento e o uso de estruturas mais apropriadas para cada combinação de tráfego e temperatura (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Do ponto de vista social, a possibilidade de reduzir o número de intervenções em rodovias, utilizando pavimentos de alto desempenho, traz benefícios tanto direta quanto indiretamente à população. Diretamente o tráfego e o tempo de espera do usuário na rodovia tendem a diminuir. Indiretamente, os recursos financeiros que serão economizados com a possível diminuição das intervenções podem gerar investimentos sociais por parte da concessionária ou do órgão público.

Novas tecnologias estão surgindo no setor da pavimentação, especialmente no que se refere aos ligantes asfálticos modificados com polímeros. Principalmente no caso do HiMA, este tipo de ligante asfáltico já é relativamente conhecido em países europeus e nos EUA. É possível que aspectos relacionados à falta de divulgação, às restrições tecnológicas e financeiras e ao pouco conhecimento dos engenheiros de pavimentação (dentre outros fatores secundários), o HiMA ainda não tem uma grande aplicação nas vias rodoviárias e urbanas do Brasil. Portanto, a condução das pesquisas complementares sobre este material – caso do presente trabalho – visa não apenas a uma maior divulgação do mesmo, mas também a uma compreensão mais adequada de suas propriedades mecânicas e de desempenho.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 PRODUÇÃO DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO - CAP

As proporções adequadas de combinação de agregado e material asfáltico para a camada de revestimento do pavimento devem ser definidas em laboratório, em função do método de dosagem. Cerca de 90% do peso da mistura é representado por agregados minerais, sendo o restante composto por ligante asfáltico. Pode-se observar que a camada do revestimento, sendo constituída pela mistura de ligante asfáltico e agregado oferece resistência tanto à compressão quanto a tração. O ligante asfáltico resiste aos esforços de tração devido à sua capacidade de aglutinação dos agregados, o que aumenta a coesão da mistura. Já o esforço de compressão é resistido pelas camadas subjacentes ao revestimento, que são compostas por materiais granulares (MONTANARI, 2007).

As misturas asfálticas têm a função de receber as cargas estáticas e dinâmicas, sem se deformar elástica ou plasticamente e também sem sofrer desagregação dos seus componentes ou perder sua compactação. O petróleo destilado é a mais importante matéria-prima para a obtenção do asfalto, que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo (BALBO, 2007).

É variável a quantidade de asfalto contida num petróleo, podendo variar de 10 a 70% dependendo de algumas características, principalmente a densidade da matéria-prima. Essas diferentes proporções resultarão em impacto direto no processo de destilação (Instituto Brasileiro de Petróleo, 1994 *apud* TINAJEROS, 2016).

Por ser um dos produtos mais antigos e versáteis da natureza, o asfalto possui uma gama variada de aplicações, desde os tempos mais remotos. Foi utilizado primeiramente pelos egípcios no ano 2600 a.C. como impermeabilizante na indústria naval, argamassa para a construção de monumentos em forma de pirâmides e aplicações variadas na construção de edificações (FONTANA FILHO, 2009).

A descoberta do asfalto refinado no início do século XX, juntamente com a popularidade do automóvel na sociedade moderna, causou uma expansão considerável do emprego deste material na indústria. O asfalto parecia ser uma solução barata e inesgotável para a solução de diversos problemas e a construção de estradas modernas (INSTITUTO DO ASFALTO, 1989 *apud* NEGRÃO, 2006).

Somente uma pequena quantidade dos aproximadamente 1500 tipos de petróleo explorados no mundo é considerada adequada para a produção de asfalto. Tendo em vista que cada petróleo possui uma composição química diferente, a sua destilação resultará em asfaltos com propriedades físicas e reológicas e composições químicas igualmente diferentes (FONTANA FILHO, 2009).

Exemplos de composições químicas de vários tipos de petróleo em função da sua localização são mostrados na Tabela 1 (LEITE, 2003 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2010).

Tabela 1 - Composição Química do Petróleo em Diversos Países

ORIGEM	Mexicano	Boscan (Venezuela)	Califórnia (EUA)	Cabiúnas (Brasil)	Cabiúnas (Brasil)	Árabe Leve (Oriente Médio)
REFINARIA	-	RLAM (BA)	-	REGAP (MG)	REPLAN (SP)	REDUC (RJ)
Carbono (%)	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio (%)	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio (%)	0,3	0,8	1,0	0,9	0,9	0,5
Enxofre (%)	5,2	5,4	1,0	0,9	2,1	4,4
Oxigênio (%)	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio (ppm)	180	1380	4	38	210	78
Níquel (ppm)	22	109	6	32	66	24

Fonte: Bernucci *et al.*, 2010

São raras as situações em que a produção de asfalto é realizada a partir de um único petróleo, sendo mais comum a utilização de diversas fontes de petróleo para então produzir uma mistura e alcançar as características desejadas (FONTANA FILHO, 2009). No caso específico do Brasil, a Petrobras possui 15 refinarias espalhadas pelo país conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Refinarias da Petrobrás

REFINARIA	LOCALIZAÇÃO	
Refinaria Isaac Sabbá	Reman	AM
Refinaria Landaupho Alves	RLAM	BA
Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste	Lubnor	CE
Refinaria Gabriel Passos	Regap	MG
Refinaria Abreu e Lima	RNEST	PE
Unidade de Industrialização do Xisto	SIX	PR
Refinaria Presidente Getúlio Vargas	Repar	PR
Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro	Comperj	RJ
Refinaria Duque de Caxias	Reduc	RJ
Refinaria Potiguar Clara Camarão	RPCC	RN
Refinaria Alberto Pasqualini	REFAP	RS
Refinaria Presidente Bernardes	RPC	SP
Refinaria de Paulínia	Replan	SP
Refinaria Henrique Lage	Revap	SP
Refinaria Capuava	Recap	SP

Fonte: Petrobrás, 2017

Na Figura 1 pode-se ver as nove refinarias com maior participação nas vendas de CAP e Asfalto Diluído de Petróleo (ADP) no Brasil.



Figura 1 - Distribuição das vendas de CAP e ADP por Refinaria da Petrobrás no ano de 2010

Fonte: SINICESP, 2012

O ligante asfáltico tem por principais funções: agir como agente impermeabilizante da mistura e atuar como elemento de ligação, pode ser um cimento asfáltico de petróleo convencional ou cimento asfáltico de petróleo modificado por polímeros (FONTANA FILHO, 2009).

2.2 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO - CAP

Aproximadamente 99,5% da composição química dos asfaltos é constituída por betume, definido como uma substância aglutinante, de cor escura e composta predominantemente por hidrocarbonetos solúveis em dissulfeto de carbono, de alto peso molecular. Por ser um material adesivo termoplástico, o CAP se liquefaz gradualmente e de maneira reversível quando aquecido (BERNUCCI *et al.*, 2010).

No que se refere às obras de pavimentação, o CAP pode ser aplicado tanto em misturas a quente – por exemplo, o CBUQ e o PMQ – quanto a frio (o PMF). A natureza termoviscoelástica do asfalto faz com que a temperatura exerça influência em todas as suas propriedades, sejam estas convencionais ou reológicas (tensão-deformação). Portanto todos os ensaios realizados para mensurar as propriedades dos ligantes asfálticos têm temperaturas especificadas por norma técnica ou pelo projeto de pesquisa. Além disso, a designação “viscoelástica” define também outro aspecto interessante do comportamento do asfalto, i. e., o fato de que o tempo e a velocidade de carregamento igualmente influenciam o resultado final de suas propriedades (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A consistência obtida a partir do ensaio de penetração a 25°C é a propriedade atualmente utilizada para classificar os ligantes asfálticos puros no Brasil, conforme especificações e critérios técnicos estabelecidos na Tabela 3. (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2005; NEGRÃO, 2006). O CAP é classificado em quatro intervalos de variação desta penetração (30-45 mm ou 30/45, 50-70 mm ou 50/70, 85-100 mm ou 85/100 e 150-200 mm ou 150/200), sendo os mais comuns nas obras rodoviárias os materiais de classificação 30/45 e 50/70.

Tabela 3 - Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) – Classificação por Penetração

CARACTERÍSTICAS	UNID.	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 a 40	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5	ME 003/1999
Ponto de amolecimento, min	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C		192	141	110	80			
a 150°C	S	90	50	43	36	NBR 14950	E102	ME 004/1994
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60			
Viscosidade Brookfield a 35°C, SP 21, 20 rpm, min		374	274	214	155			
a 150°C, SP 21, min	Cp	203	112	97	81	NBR 15184	D 4402	
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 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, min	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D92	ME 148/994
Solubilidade em tricloroetileno, min	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/1994
Ductibilidade a 25°C, min	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D113	ME 163/1998
Efeito do calor e do ar (RTFOT), A 163°C, 85 min								
Variação em massa, min	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872	
Ductibilidade a 25°C, min	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/1998
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, min. (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/1999

Fonte: Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis, 2005

O envelhecimento é outro fenômeno importante que interfere nos cimentos asfálticos, que se inicia quando o CAP é aquecido na usina para a mistura com os agregados pétreos, a temperaturas que tipicamente variam de 140 a 165°C para os materiais puros e de 170 a 190°C para os modificados. Nessa fase ocorre o aumento da viscosidade e conseqüentemente a diminuição da penetração. A perda de componentes voláteis juntamente com a oxidação durante a fase de construção resulta no chamado “envelhecimento a curto prazo”. O envelhecimento designado como “longo prazo” é resultado da progressiva oxidação durante a vida útil do pavimento. O envelhecimento geralmente resulta no enrijecimento da mistura asfáltica, o que pode acarretar benefícios à sua resistência à deformação permanente. Por outro lado, este enrijecimento poderá resultar em uma perda da resistência ao desgaste, tendência ao trincamento precoce por fadiga e aumento da suscetibilidade à umidade (LIANG e LEE, 1996 *apud* ROHDE, 2007).

Embora, em geral, o envelhecimento possa resultar no enrijecimento da mistura, o que pode ser benéfico do ponto de vista da distribuição das cargas e da deformação permanente, poderá também resultar em um pavimento com tendências ao trincamento e na perda de durabilidade em termos de resistência ao desgaste e suscetibilidade à umidade (LIANG e LEE, 1996 *apud* ROHDE, 2007).

2.3 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO MODIFICADO POR POLÍMEROS

O asfalto modificado por polímeros é uma formulação composta por CAP e um ou mais tipos de polímeros, que podem variar de 3 a 8% em relação à massa total da formulação (CERATTI, 2015). As misturas tem sido uma possibilidade de solução para as frequentes rupturas precoces do pavimento, especialmente a deformação permanente e a formação de trincas por fadiga (RHODE, 2007). Estas rupturas prematuras da mistura asfáltica ocorrem principalmente em rodovias com tráfego pesado ou canalizado, o que indica a necessidade de materiais mais resistentes ou misturas asfálticas dosadas segundo critérios técnicos menos subjetivos do ponto de vista técnico, por exemplo, Superpave em vez de Marshall.

A concentração, os tipos de modificadores e a composição química do CAP - além do uso de agentes compatibilizantes, se for o caso - influenciam diretamente nas propriedades dos asfaltos modificados. Um destes principais modificadores é o polímero elastomérico SBS (*styrene-butadiene-styrene*, ou “estireno-butadieno-

estireno”), que possui uma estrutura que favorece tanto a adesividade ao agregado quanto a elasticidade do CAP. A resistência ao envelhecimento e à oxidação também são propriedades que sofrem melhorias significativas devido à adição de polímeros ao CAP (CERATTI, 2015).

A mistura do CAP com o SBS deve ser feita a temperaturas de aproximadamente 180°C e em misturadores de alto cisalhamento. A modificação do asfalto só se dará de maneira correta caso haja a compatibilidade adequada entre o CAP e o polímero elastomérico SBS. Um elastômero é um material macromolecular que recupera rapidamente a sua dimensão e forma iniciais, após cessar a solitação. A classificação dos CAPs modificados por polímeros elastoméricos se dá de forma diferente da classificação dos CAPs convencionais, pois levam em consideração o ponto de amolecimento e a recuperação elástica a 25°C em vez da penetração. Existem três classificações de CAPs modificados por polímeros elastoméricos, sendo elas: 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E. O primeiro algarismo da classe corresponde ao ponto de amolecimento mínimo (°C) e o segundo à recuperação elástica mínima (%) (CERATTI, 2015). Os detalhes desta especificação e os limites mínimos e máximos a serem respeitados pelos materiais modificados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados por Polímeros Elastoméricos

ENSAIOS NA AMOSTRA VIRGEM	MÉTODOS	55/75 - E	60/85 - E	65/90 - E
		LIMITE DE ESPECIFICAÇÃO		
Penetração 25°C, 5s, 100g, dmm	NBR 6576	45 - 70	45 - 70	45 - 70
Ponto de amolecimento min., °C	NBR 6560	55	60	65
Viscosidade Brookfield a 135°C, Spindle 21, 20 rpm, máx., cP	NBR 15184	3000	3000	3000
Viscosidade Brookfield a 150°C, Spindle 21, 50 rpm, máx., cP	NBR 15184	2000	2000	2000
Viscosidade Brookfield a 175°C, Spindle 21, 100 rpm, máx., cP	NBR 15184	1000	1000	1000
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15166	5	5	5
Recuperação elástica a 25°C, 20cm, min., %	NBR 15086	75	85	90
ENSAIOS NO RESÍDUO DO RTFOT				
Varição de massa, máx., %	ASTM D 2872	1	1	1
Varição do PA, °C, máx.	NBR 6560	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7
Porcentagem de penetração original, min.	NBR 6576	60	60	60
porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín	NBR 15086	80	80	80

Fonte: Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis, 2010

O regulamento técnico nº 04/2010 da Agência Nacional do Petróleo (ANP,

2010) não especifica a concentração nem o tipo de elastômero que deve ser usado para a síntese do CAP modificado. Porém, para se alcançar as especificações de cada classe é necessário a adição de diferentes teores de elastoméricos ao CAP (CERATTI, 2015).

Quando comparado ao CAP convencional, o modificado por polímeros elastoméricos apresenta maior estabilidade em temperaturas elevadas e maior flexibilidade em se tratando de temperaturas mais baixas, trata-se da principal característica dos CAPs modificados (RHODE, 2007).

Os modificadores vêm sendo utilizado para melhorar as propriedades físicas, mecânicas e químicas dos pavimentos flexíveis, consequentemente diminuindo significativamente a formação de defeitos de tal. São adicionados produtos como agentes melhoradores de adesividade (DOPE), agentes rejuvenescedores e polímeros (SBR, SBS, EVA etc.). A adição de polímeros em asfalto tem resultado em produtos de melhor qualidade. As principais características dos asfaltos modificados por polímeros são um aumento na recuperação elástica, no ponto de amolecimento, na viscosidade e até mesmo na trabalhabilidade da massa (MOTTA *et al.*, 2011). Os principais modificadores poliméricos utilizados no Brasil estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Principais Modificadores Poliméricos

Polímero	Modificadores		
Elastômeros	SBS	SB	SBR
Plastômeros	PEAD	EVA	EVA Funcional

Fonte: ABEDA, 2007

2.4 LIGANTE ASFÁLTICO ALTAMENTE MODIFICADO POR POLÍMEROS - HIMA

O HiMA (*Highly Modified Asphalt*) é um ligante asfáltico altamente modificado por polímeros, obtido por meio da adição de polímeros especiais ao asfalto. Essa composição resulta em um melhor desempenho do pavimento em relação à deflexão de sua condição estrutural, ao trincamento, às trilhas de roda, entre outros. Outra vantagem do HiMA, é que em uma amplitude térmica que varia de - 30 °C a 70 °C. Sendo assim o HiMA mantém suas propriedades elastoméricas, o que reduz a deformação permanente do asfalto em altas temperaturas e elimina seu

comportamento frágil em baixas temperaturas (INFRAESTRUTURA URBANA, 2017).

Essa nova tecnologia pode elevar a taxa de polímero SBS a mais que o dobro da empregada em asfaltos modificados comuns, além de ser uma mistura viável e de fácil aplicação em campo. É garantida ao HiMA uma resistência à fadiga e à deformação permanente maior que nos CAPs modificados por polímeros elastoméricos convencionais tipo 55/75, 60/85 e 65/90, tendo em vista a sua alta concentração de polímeros. Deste modo, o HiMA pode ser visto mais como um “polímero modificado por asfalto” do que um asfalto modificado por polímero (REIS *et al.*, 2016).

O desempenho do HiMA é baseado na mudança drástica no seu comportamento reológico. Polímeros SBS podem absorver até dez vezes seu peso quando incorporados ao asfalto. Portanto, quando 2,5% de polímero SBS é adicionada ao asfalto, o ligante modificado vai se comportar como se fosse composto por 25% de elastômero e 75% de asfalto. Neste caso, a fase predominante na matriz asfalto-polímero continuará sendo a asfáltica e as características predominantes serão a do material betuminoso. No entanto, ao adicionar porcentagens maiores que 7,5% de SBS, o CAP modificado comporta-se predominantemente como um elastômero devido ao fenômeno de inversão de fases (fase polimérica predomina sobre a asfáltica), com uma verdadeira rede polimérica contínua e resistente, como é possível observar na Figura 2. As propriedades do HIMA incluem alto ponto de amolecimento, elevado módulo, grande elasticidade e extrema resiliência (REIS *et al.*, 2016).

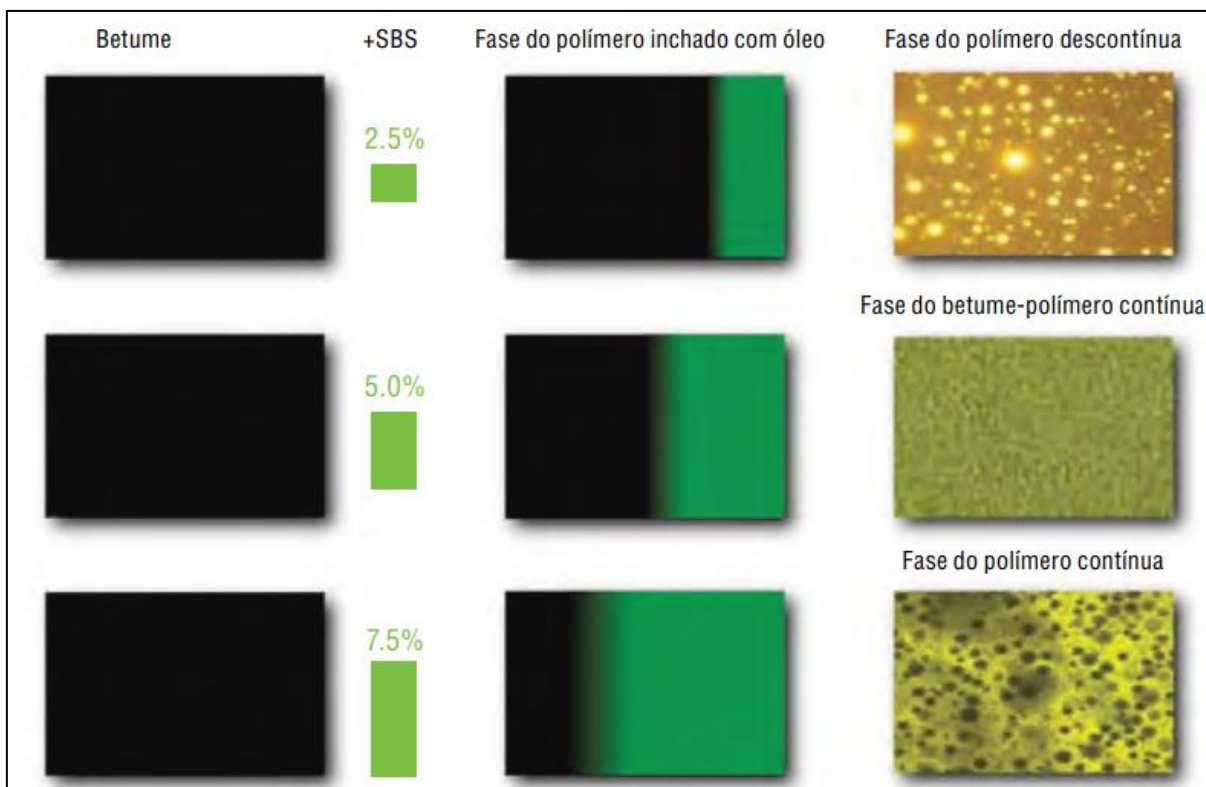


Figura 2 - Efeito do aumento dos teores de polímero SBS na morfologia do polímero/asfalto Fonte: Kraton Performance Polymers, Inc. – 2012

A inserção de alto teor de polímero na matriz asfáltica tem por objetivo desenvolver uma rede polimérica contínua, atuante como um reforço elástico no ligante, que reduz a propagação de fissuras pelo ligante asfáltico. Como se pode observar na Figura 2, baixos teores de polímero desenvolvem redes descontínuas, possibilitando a aparição de pontos fracos que permitem o avanço da fissura pelo ligante (BŁAŻEJOWSKI *et al.*, 2015). Segundo a revista *Infraestrutura Urbana* (2017), a tecnologia HiMA tem seu uso permitido em diversas aplicações na pavimentação devido a combinação de sua baixa viscosidade com alto desempenho mecânico. Abaixo são citadas algumas de suas aplicações:

- Em camadas de rolamento: é possível a construção de pavimentos com espessuras menores e desempenho igual ou superior aos convencionais quanto à fissura e à deformação tipo "trilha de roda", devido o alto teor de polímeros.
- Em camadas de base e binder: devido à sua alta resistência à fadiga, a tecnologia HiMA possibilita o dimensionamento de camadas mais finas e com maior durabilidade.
- Em tratamentos superficiais: a tecnologia HiMA também pode ser empregada em tratamentos superficiais a quente, pois sua alta coesão e grande capacidade

elástica, juntamente com baixa viscosidade são propriedades adequadas para essa finalidade.

Segundo Silva (2018), estudos apontam que a modificação de ligantes com o polímero SBS, no teor de 7,5 %, constituindo o CAP HiMA, conferem a este propriedades que são capazes de resistir a maiores níveis de deformação e por consequência obter uma maior vida útil, há também a possibilidade de uma redução da espessura de camada asfáltica para uma mesma vida de serviço quando comparado com outros ligantes. Para Silva, os estudos não devem se limitar ao ligante, pois mesmo ele sendo o principal elemento do pavimento, deve ser estudada a mistura asfáltica como um todo, pois a composição da mesma poderá resultar em diferentes características.

2.5 DEFEITOS COMUNS AO PAVIMENTO ASFÁLTICO

A dependência de uma série de fatores tanto ambientais, quanto relacionados às cargas, como tempo, aplicação e frequência, e o envelhecimento das misturas torna a caracterização mecânica dos materiais asfálticos uma tarefa complexa (NOGUEIRA, 2008).

No Brasil, a maior parte dos pavimentos está suscetível aos efeitos do envelhecimento, apresentando um desgaste prematuro, podendo ser ocasionado por fatores externos, como clima, tráfego e manutenção inadequada, ou por falhas de projeto e execução (GUSMÃO, 2009).

Para o usuário, a parte mais importante do pavimento é o estado da sua superfície, os defeitos e irregularidades, pois é o que afeta o seu conforto. Quando este é prejudicado, é provável que o veículo também venha a sofrer as consequências dos defeitos, levando a um aumento nos custos com combustível, pneus e manutenções precoces (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Ao longo de sua vida útil, o pavimento está sujeito a uma diminuição de seu desempenho funcional e estrutural. Essa diminuição está relacionada, em grande parte, a alguns defeitos que surgem no pavimento, entre estes os principais são: trincas por fadiga, deformação permanente, trincas a baixas temperaturas e o desgaste (TINAJEROS, 2016).

2.5.1 Fadiga

O número de aplicações de carga necessárias para que uma mistura asfáltica atinja a ruptura pode ser definido como a vida de fadiga do material. Tecnicamente o fenômeno da fadiga pode ser descrito como o efeito da diminuição gradual da resistência de um material através de solicitações repetitivas, ou descarregamento e carregamento constante do pavimento, em virtude da ação do tráfego, desta forma gerando deformações elásticas. O processo constante de deformação e recuperação elástica resulta em tensões de tração nas fibras inferiores da camada de asfalto do pavimento, resultante assim em danos progressivos a cada ciclo, até finalmente ocasionar no rompimento (ZEGARRA, 2007).

Os valores das tensões e deformações que se desenvolvem no pavimento são influenciados principalmente pelos seguintes parâmetros:

- Características do tráfego: carga por roda, pressão de contato, velocidade do veículo e intensidade do tráfego;
- Características próprias do pavimento: espessura e rigidez das camadas;
- Condições climáticas, em particular, a temperatura.

As tensões de tração que se desenvolvem na camada inferior do revestimento, de modo geral:

- Variam relativamente pouco com a espessura da camada de base (quando esta é superior a 20 cm) e com o módulo de rigidez do solo de fundação (subleito);
- Diminuem com o aumento da temperatura e conseqüentemente com o decréscimo do módulo de rigidez;
- Diminuem com o aumento do módulo de rigidez da base;
- Diminuem com o aumento da espessura do próprio revestimento e aumentam com o acréscimo do módulo de rigidez do cimento asfáltico (GONTIJO, 1980 *apud* AMARAL, 2000).

Visando um bom funcionamento de toda a estrutura, o fenômeno da abertura de fendas na superfície do pavimento deve evitado ou retardado ao máximo, já que através das fendas pode ocorrer a entrada de água para os pavimentos inferiores, causando assim a diminuição da capacidade de suporte do pavimento e da segurança, também aumentando o desconforto durante a circulação na via. Além

disso, as fendas aceleram a ruína de toda a estrutura, pois são responsáveis pela concentração de tensões nas camadas do pavimento (PAIS,1999).

As figuras 3, 4 e 5 abaixo são exemplos de defeitos no pavimento.



Figura 3 - Trinca Isolada Longitudinal
Fonte: DNIT 005/2003



Figura 4 - Trinca Interligada Tipo Jacaré
Fonte: DNIT 005/2003



Figura 5 - Trinca Isolada Transversal
Fonte: DNIT 005/2003

2.5.2 Deformação Permanente

Diversos são os fatores que interferem na ocorrência das deformações permanentes, a aplicação de cargas repetidas em virtude da passagem de veículos na via, a pressão de enchimento dos pneus, a temperatura do pavimento, as práticas construtivas e os fatores internos relacionados às características das camadas do pavimento (ANANI *et al.*, 1990 *apud* ZEGARRA, 2007).

A escolha correta dos sistemas de drenagem e da composição das misturas betuminosas do pavimento, assim como a correta escolha dos materiais granulares, pode ser a solução para o fenômeno das deformações permanentes que causam desconforto e insegurança na circulação rodoviária (PAIS, 1999).

Em temperaturas maiores de 60°C, as propriedades do ligante asfáltico passam a ter uma influência significativa no acréscimo da resistência à deformação permanente nas camadas de CBUQ. Os asfaltos modificados-SBS tem maior

resistência à deformação permanente em comparação aos asfaltos convencionais (BOULDIN e COLLINS, 1992 *apud* AMARAL, 2000).

O aumento da resistência à deformação permanente de uma mistura asfáltica sofre interferência direta do tipo de asfalto empregado. O asfalto modificado com polímero SBS consegue melhorar significativamente a resistência a deformação permanente (CORTÉ *et al.*, 1994 *apud* TINAJEROS, 2006).

Esforços cisalhantes que ocorrem na parte superior da camada de CBUQ são responsáveis pela maior parte das deformações permanentes dos pavimentos brasileiros. Desta forma, misturas asfálticas com menos de 4% de teor de vazios e elevados teores de ligantes, estão sujeitas a deformações permanentes por movimentação plástica, afundamento das trilhas de roda acompanhado por elevações laterais. Este fenômeno ocorre porque os espaços vazios são preenchidos com ligante, o que o torna um lubrificante das partículas do agregado, que por sua vez tende a se deslocar sob influência do tráfego de veículos. Essa característica tende a se acentuar em temperaturas elevadas, quando o ligante facilita ainda mais as deformações por cisalhamento (GRECO, 2004).

O principal exemplo de deformação permanente nos pavimentos revestidos com misturas asfálticas é a trilha de roda, que possui razões principais, sendo estas: o fator estrutural, resultante das contribuições de todas as camadas de pavimento e do subleito; e o dimensionamento incoerente de misturas asfálticas, que resultam em baixa resistência ao cisalhamento, em virtude da susceptibilidade térmica do ligante asfáltico e do esqueleto do agregado mineral (TINAJEROS, 2016).

Na Figura 6 está apresentado um exemplo de afundamento de trilha de roda.



Figura 6 - Afundamento de Trilha de Roda
Fonte: DNIT 005/2003

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização dos ligantes asfálticos foi feita através da realização de ensaios normatizados em laboratório certificado. Estes resultados foram então comparados entre si estatisticamente.

3.1 LABORATÓRIO DE CONTROLE TECNOLÓGICO

Todos os ensaios contemplados por este trabalho de conclusão de curso foram realizados no laboratório da empresa E-Vias Empresa Latino Americana De Consultoria Viária LTDA, localizado na Rua Baltazar Carrasco dos Reis, Nº 2345, na cidade de Curitiba - PR. O material ensaiado foi fornecido pela empresa Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo.

3.2 MATERIAL UTILIZADO

Para realização dos ensaios foram utilizados três tipos de CAP: o convencional 50/70 e os modificados, 55/75 e o HiMA.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A verificação da existência de diferenças reais entre os tratamentos, composições e métodos adotados neste trabalho foi feita mediante a Análise da Variância (ANOVA), que é o processo de decomposição da variação total nas componentes explicadas e não explicadas ou residuais. Esta decomposição segue a disposição apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Função F de Snedecor
Explicada	$\sum(Y_{est} - Y_{med})^2$	k	$\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{k}$	
Não Explicada	$\sum(Y - Y_{est})^2$	$(n - k - 1)$	$\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}$	$\frac{\sum(Y_{est} - Y_{med})^2}{\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{n - k - 1}}$
Total	$\sum(Y - Y_{med})^2$	$(n - 1)$		

Fonte: Lima, 2013

Neste trabalho, para determinação da Análise de Variância foi utilizado o *software Statgraphics® Plus 4.1*.

Uma vez que as variâncias apresentassem diferenças significativas, é importante determinar quais grupos de médias, em particular, são importantes. Para tal análise utilizou-se, neste trabalho, o procedimento *denominado Multiple Range Test*, através do teste de *Tukey-Kramer*, mediante o uso do mesmo *software*.

3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO LIGANTE

3.4.1 Determinação da Viscosidade – Viscosímetro *Brookfield*

A determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas foi contemplada através da utilização de um Viscosímetro Rotacional, de acordo com a NBR 15184 (ABNT, 2004).

O ensaio contido na norma consiste em um aparelho que gira um corpo cilíndrico (*spindle*), em velocidade constante e uniforme, mergulhado num fluido. Essa rotação determina uma força necessária para vencer a resistência que o material tem de fluir. O ensaio deve ser realizado a 3 temperaturas, para determinação da curva de viscosidade. Temperaturas correntes no certificado de ensaio: 135°C, 150°C e 177°C.

Para a realização deste ensaio foram moldados três corpos de prova para cada um dos três ligantes listados anteriormente.

Na Figura 7 é apresentada a utilização do Viscosímetro *Brookfield* na determinação da Viscosidade.



Figura 7 - Viscosímetro *Brookfield*
Fonte: Autoria Própria

3.4.2 Determinação da Penetração

A determinação da Penetração foi realizada de acordo com a NBR 6576 (ABNT, 2007).

A Penetração pode ser definida como a distância em décimo de milímetro (0,1 mm) que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de asfalto sob condições pré-fixadas de carga, tempo e temperatura. Deve-se fazer 3 determinações em pontos da superfície da amostra distante entre si e da borda do recipiente de 1 cm, no mínimo. O resultado será a média das três determinações. Para a realização deste ensaio foram moldados três corpos de prova para cada um dos três ligantes listados anteriormente.

Os Corpos de Prova dos ensaios de Penetração, que está representado nas Figuras 9, 10 e 11, e Recuperação Elástica, estão apresentados na Figura 8.

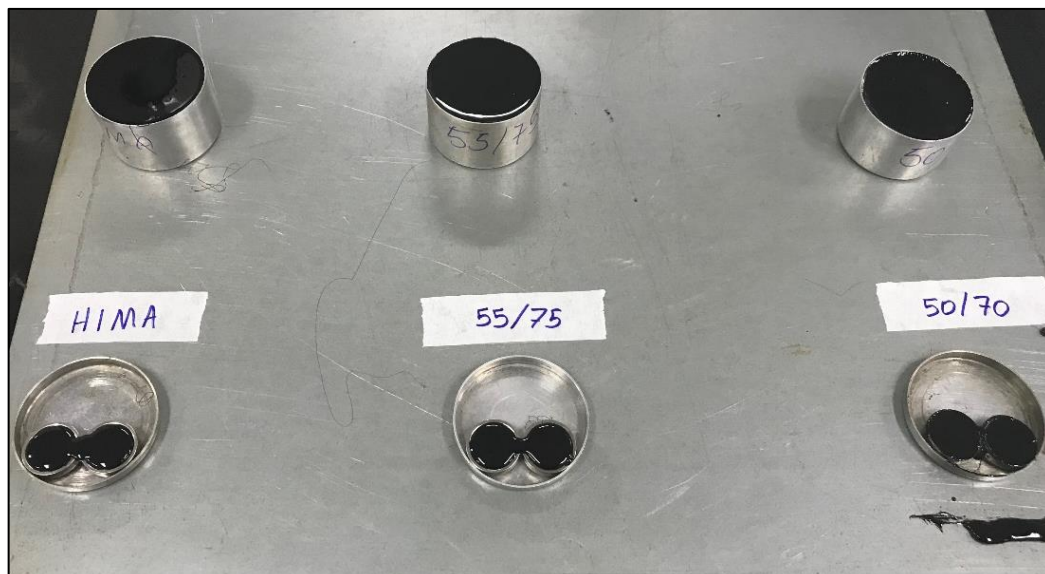


Figura 8 - Corpos de Prova – Penetração e Recuperação Elástica
Fonte: Autoria Própria

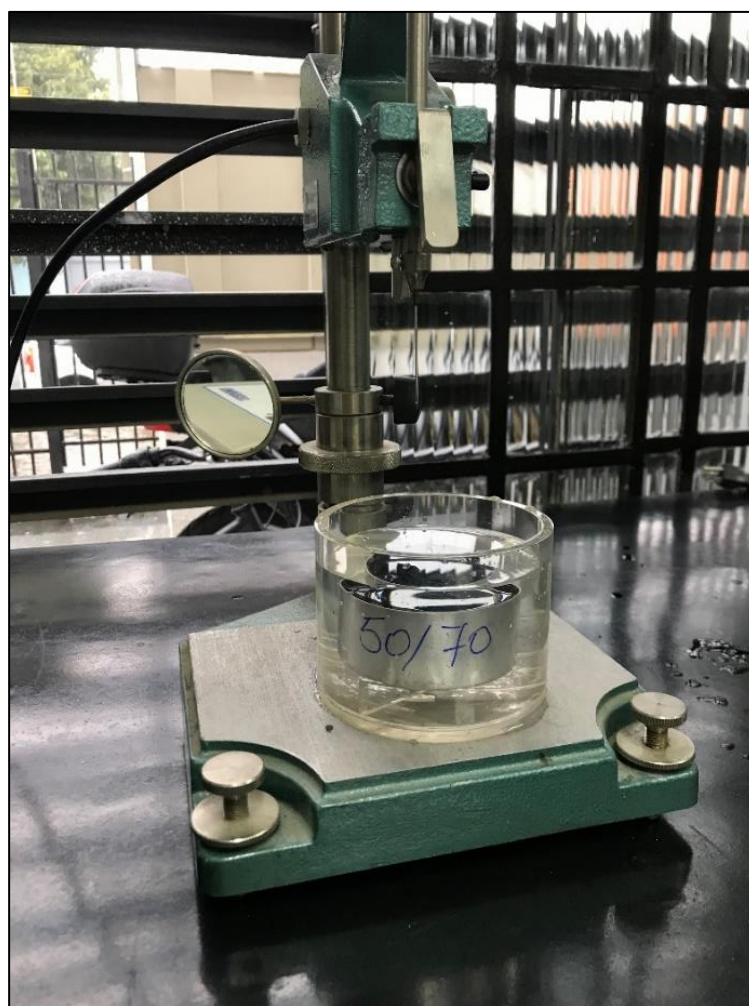


Figura 9 - Determinação da Penetração – CAP 50/70
Fonte: Autoria Própria



Figura 10 - Determinação da Penetração – CAP 55/75
Fonte: Autoria Própria



Figura 11 - Determinação da Penetração – HIMA
Fonte: Autoria Própria

3.4.3 Determinação do Ponto de Amolecimento

A determinação do Ponto de Amolecimento foi realizada através do Método do Anel e Bola, de acordo com a NBR 6560 (ABNT, 2000).

O Ponto de amolecimento é a temperatura no momento em que uma esfera metálica especificada, atravessa um anel também especificado, perfeitamente cheio com material asfáltico e toca em uma placa de referência. A distância percorrida pela esfera é de 25 mm sob condições especificadas.

Está contemplado nas Figuras 15 e 16 o ensaio do Ponto de amolecimento, onde, os Corpos de Prova, por sua vez, estão representados nas Figuras 12, 13 e 14.



Figura 12 - Corpo de Prova – Determinação do Ponto de Amolecimento - CAP 50/70
Fonte: Autoria Própria

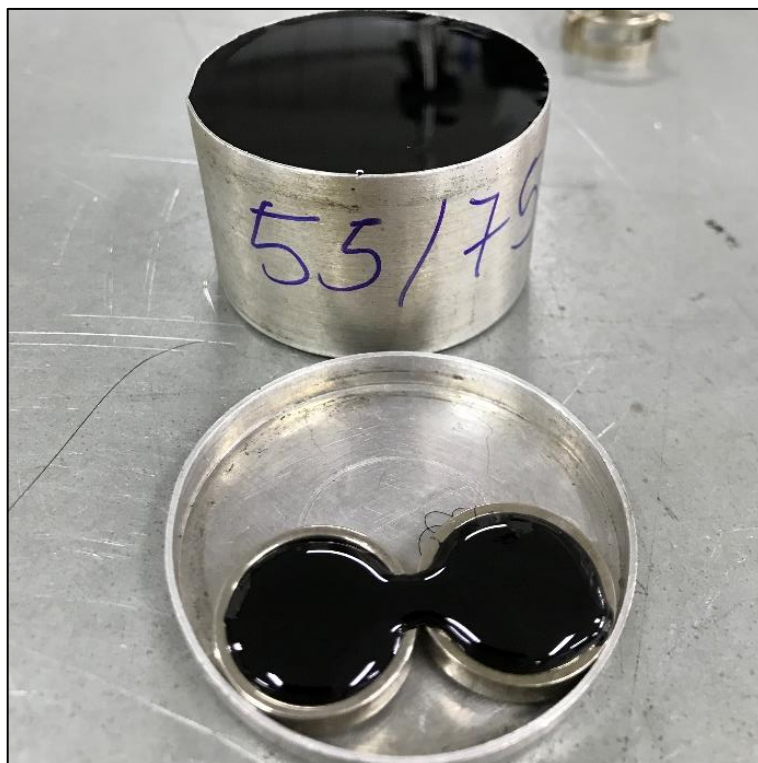


Figura 13 - Corpo de Prova – Determinação do Ponto de Amolecimento - CAP 55/75
Fonte: Autoria Própria



Figura 14 - Corpo de Prova – Determinação do Ponto de Amolecimento HIMA
Fonte: Autoria Própria



Figura 15 - Determinação do Ponto de Amolecimento – Método Anel e Bola
Fonte: Autoria Própria

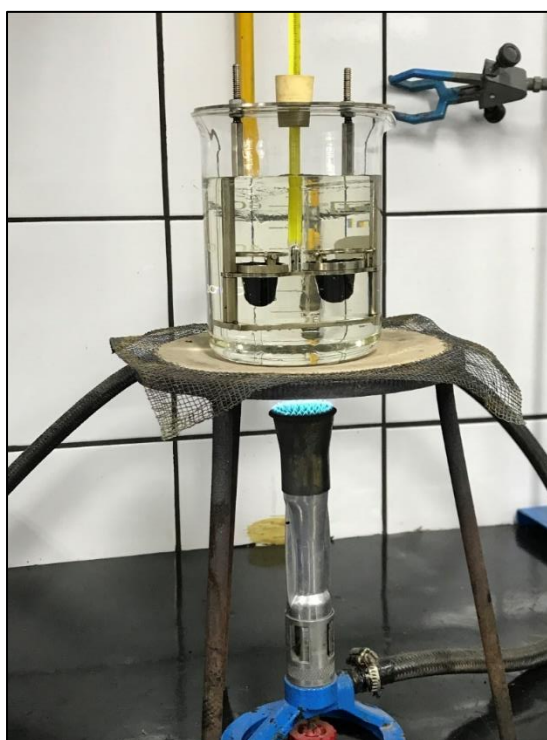


Figura 16 - Determinação do Ponto de Amolecimento – Método Anel e Bola
Fonte: Autoria Própria

3.4.4 Determinação do Ponto de Fulgor

A determinação do Ponto de Fulgor foi realizada através do método Vaso Aberto Cleveland, cumprindo a NBR 11341 (ABNT, 2014).

O Ponto de fulgor é a menor temperatura na qual o derivado de petróleo emite vapores capazes de queimar em sua superfície mediante a presença de uma fonte externa de ignição.

Na Figura 17 está apresentada a realização do ensaio do Ponto de Fulgor.



Figura 17 - Determinação do Ponto de Fulgor
Fonte: Autoria Própria

3.4.5 Determinação da Recuperação Elástica

A determinação da Recuperação Elástica foi contemplada com utilização do Ductilômetro, de acordo com a NBR 15086 (ABNT, 2006).

A Recuperação elástica é a medida da capacidade de retorno do material asfáltico, após interrupção da tração mecânica especificada.

Para a realização do ensaio foi utilizado o ductilômetro modificado, conforme apresentado nas Figuras 18, 19, 20 e 21.



Figura 18 - Corpo de Prova - Recuperação Elástica – CAP 55/75
Fonte: Autoria Própria

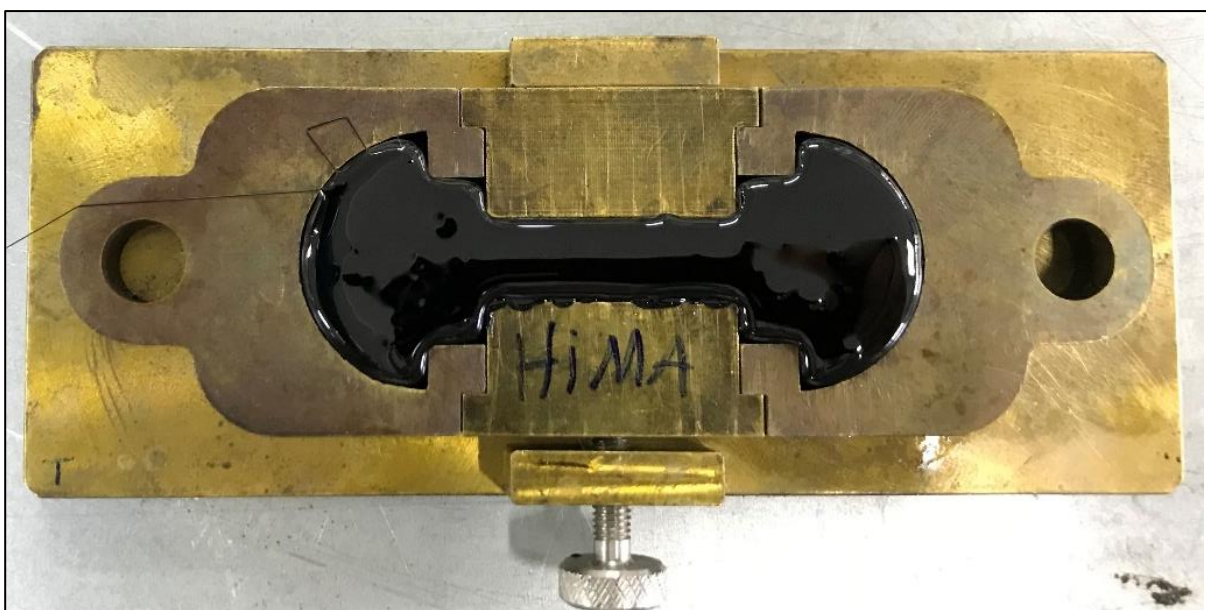


Figura 19 - Corpo de Prova - Recuperação Elástica – HIMA
Fonte: Autoria Própria

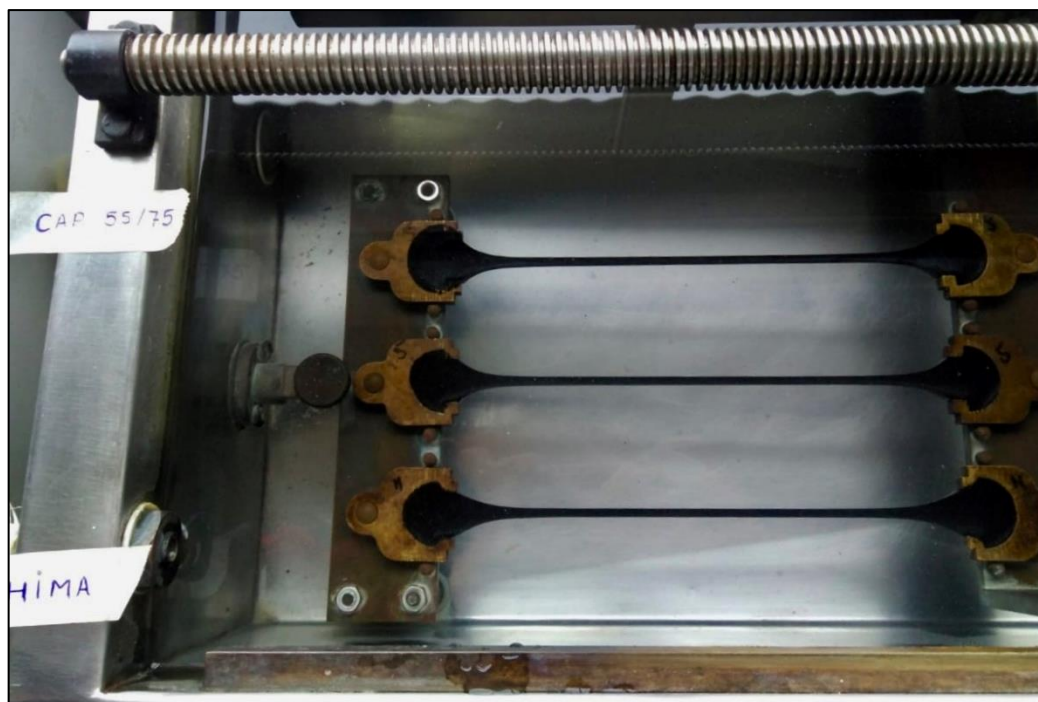


Figura 20 - Ensaio de Recuperação Elástica
Fonte: Autoria Própria

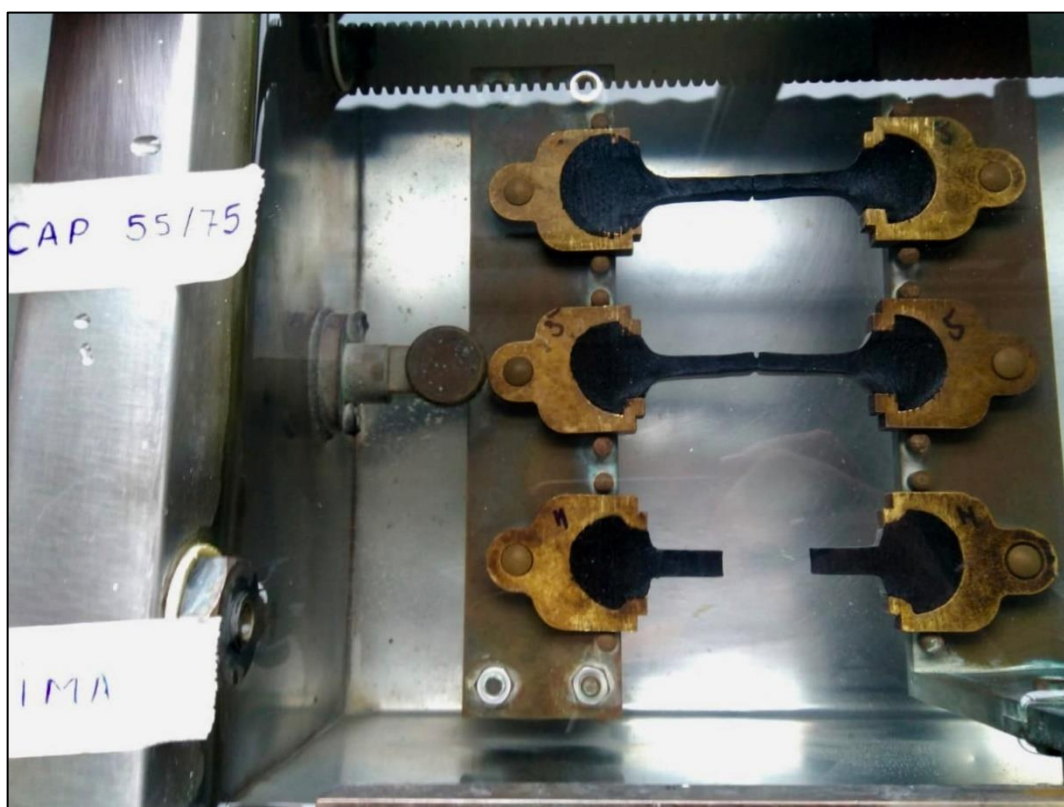


Figura 21 - Corpos de Prova Ensaçados - Recuperação Elástica
Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ligante asfáltico denominado CAP HiMA, embora seja modificado por polímero elastomérico, não há especificação brasileira vigente para este produto, desta forma, considerou-se os limites propostos pela Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo para os ensaios de Viscosidade, Penetração, Ponto de Amolecimento, Ponto de Fulgor, Recuperação Elástica, descritos, respetivamente, nos itens 1, 2, 3, 4 e 5 deste capítulo.

4.1 VISCOSIDADE

O ensaio de viscosidade foi realizado com auxílio do Viscosímetro *Brookfield*. Foram feitas medições em três temperaturas diferentes para cada amostra: 135°C, 150°C e 177°C. Nas Tabelas 7, 9 e 11 são apresentados os resultados do ensaio, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A Análise da Variância ANOVA obtida através do software *Statgraphics® Plus 4.1* está apresentada nas Tabelas 8, 10 e 12.

Tabela 7 – Resultados Ensaio Viscosidade *Brookfield* à 135°C, SP21, 20 RPM

LIGANTE	UNIDADE	LIMITES		CP	VALORES (cP)	MÉDIA (cP)	Sd (cP)	CV (%)
		MÍNIMO	MÁXIMO					
50/70	cP	274,0	-	CP1	350,0	320,00 C	26,46	8,27
				CP2	300,0			
				CP3	310,0			
55/75	cP	-	3.000,0	CP1	1.037,0	923,67 B	98,15	10,63
				CP2	867,0			
				CP3	867,0			
HiMA	cP	-	3.000,0	CP1	1.990,0	1.930,00 A	95,39	4,94
				CP2	1.980,0			
				CP3	1.820,0			

Fonte: Autoria Própria

Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey-Kramer, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; CV: Coeficiente de Variação.

Tabela 8 - Análise da Variância ANOVA Viscosidade *Brookfield* à 135°C, SP21, 20 RPM

FONTE DA VARIACÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	FUNÇÃO F	P-VALOR
Explicada	3,96922E+06	2	1,98461E+06	306,37	0,0000
Não Explicada	38866,7	6	6477,78		
Total	4,00809E+06	8			

Fonte: Autoria Própria

Nota: Se o P-valor é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Tabela 9 - Resultados Ensaio Viscosidade *Brookfield* à 150°C, SP21, 50 RPM

LIGANTE	UNIDADE	LIMITES		CP	VALORES (cP)	MÉDIA (cP)	Sd (cP)	CV (%)
		MÍNIMO	MÁXIMO					
50/70	cP	112,0	-	CP1	176,0	162,33 C	12,34	7,60
				CP2	152,0			
				CP3	159,0			
55/75	cP	-	2.000,0	CP1	478,0	421,33 B	49,07	11,65
				CP2	393,0			
				CP3	393,0			
HiMA	cP	-	2.000,0	CP1	875,0	830,00 A	69,46	8,37
				CP2	865,0			
				CP3	750,0			

Fonte: Autoria Própria

Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey-Kramer, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; CV: Coeficiente de Variação.

Tabela 10 - Análise da Variância ANOVA Viscosidade *Brookfield* à 150°C, SP21, 50 RPM

FONTE DA VARIACÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	FUNÇÃO F	P-VALOR
Explicada	679868,0	2	339934,0	138,08	0,0000
Não Explicada	14771,3	6	2461,89		
Total	694640,0	8			

Fonte: Autoria Própria

Nota: Se o P-valor é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Tabela 11 - Resultados Ensaio Viscosidade *Brookfield* à 177°C, SP21, 100 RPM

LIGANTE	UNIDAD E	LIMITES		CP	VALORES (cP)	MÉDIA (cP)	Sd (cP)	CV (%)
		MÍNIMO	MÁXIMO					
50/70	cP	57,0	285,0	CP1	60,0	60,67 C	4,04	6,66
				CP2	65,0			
				CP3	57,0			
55/75	cP		1.000,0	CP1	180,0	175,00 B	4,33	2,47
				CP2	172,5			
				CP3	172,5			
HiMA	cP		1.000,0	CP1	325,0	313,00 A	12,53	4,00
				CP2	314,0			
				CP3	300,0			

Fonte: Autoria Própria

Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey-Kramer, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; CV: Coeficiente de Variação.

Tabela 12 - Análise da Variância ANOVA Viscosidade *Brookfield* à 177°C, SP21, 100 RPM

FONTE DA VARIAÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	FUNÇÃO F	P-VALOR
Explicada	95788,2	2	47894,1	748,02	0,0000
Não Explicada	384,167	6	64,0278		
Total	96172,4	8			

Fonte: Autoria Própria

Nota: Se o P-valor é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Como esperado, o resultado da viscosidade do ligante HiMA se apresentou superior aos dos demais ligantes. Além disso, a análise *Tukey-Kramer* demonstrou que existem diferenças estatísticas significantes entre as médias, o que confirma esta superioridade. Os bons resultados da viscosidade do HiMA contribuem para a possibilidade de menores deformações permanentes de misturas com este ligante, um defeito que pode ser minimizado com o uso desse ligante é o afundamento de trilha de roda, demonstrado na Figura 6.

4.2 PENETRAÇÃO

O ensaio de penetração foi realizado com auxílio de um Penetrômetro Semiautomático. Foram ensaiadas três amostras de cada material. Na Tabela 13 são apresentados os resultados do ensaio, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A Análise da Variância ANOVA obtida através do *software Statgraphics® Plus 4.1* está apresentada na Tabela 14.

Tabela 13 - Resultados Ensaio Penetração à 25°C, 5s, 100g

LIGANTE	UNIDADE	LIMITES		CP	VALORES (°C)	MÉDIA (0,1 mm)	Sd (0,1 mm)	CV (%)
		MÍNIMO	MÁXIMO					
50/70	0,1 mm	50,0	70,0	CP1	54,0	56,0 A	4,36	7,78
				CP2	61,0			
				CP3	53,0			
55/75	0,1 mm	45,0	70,0	CP1	60,0	60,0 A	0,01	0,01
				CP2	60,0			
				CP3	60,0			
HiMA	0,1 mm	40,0	70,0	CP1	46,0	46,0 B	0,00	0,00
				CP2	46,0			
				CP3	46,0			

Fonte: Autoria Própria

Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey-Kramer, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; CV: Coeficiente de Variação.

Tabela 14 - Análise da Variância ANOVA Penetração à 25°C, 5s, 100g

FONTE DA VARIACÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	FUNÇÃO F	P-VALOR
Explicada	312,00	2	156,0	24,61	0,0013
Não Explicada	38,04	6	6,34		
Total	350,04	8			

Fonte: Autoria Própria

Nota: Se o P-valor é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Como esperado, o resultado de penetração do ligante HiMA se apresentou menor do que o dos demais ligantes. Além disso, a análise *Tukey-Kramer* demonstrou

que existem diferenças estatísticas significantes entre as médias do HiMA e dos demais ligantes, o que confirma esta superioridade. Esse índice inferior mostra que Asfalto Altamente Modificado é um material mais rígido, sendo mais aconselhado para uso em temperaturas mais elevadas e também sofrendo menos deformação devido ao tráfego.

4.3 PONTO DE AMOLECIMENTO

A determinação do Ponto de Amolecimento foi realizada através do método do Anel e Bola. Foram ensaiadas três amostras de cada material. Na Tabela 15 são apresentados os resultados do ensaio, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A Análise da Variância ANOVA obtida através do *software Statgraphics® Plus 4.1* está apresentada na Tabela 16.

Tabela 15 - Resultados Ensaio Ponto de Amolecimento

LIGANTE	UNIDADE	LIMITES		CP	VALORES (°C)	MÉDIA (°C)	Sd (°C)	CV (%)
		MÍNIMO	MÁXIMO					
50/70	°C	46,0	-	CP1	48,3	48,13 C	0,47	0,98
				CP2	47,6			
				CP3	48,5			
55/75	°C	55,0	-	CP1	58,5	60,50 B	1,73	2,86
				CP2	61,5			
				CP3	61,5			
HiMA	°C	80,0	-	CP1	90,0	89,67 A	0,58	0,64
				CP2	89,0			
				CP3	90,0			

Fonte: Autoria Própria

Nota: De acordo com o resultado do teste Tukey-Kramer, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; CV: Coeficiente de Variação.

Tabela 16 - Análise da Variância ANOVA Ponto de Amolecimento

FONTE DA VARIACÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	FUNÇÃO F	P-VALOR
Explicada	2728,65	2	1364,32	1150,79	0,0000
Não explicada	7,11	6	1,18556		
Total	2735,76	8			

Fonte: Autoria Própria

Nota: Se o P-valor é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Como esperado, o resultado do ponto de amolecimento do ligante HiMA se apresentou superior ao dos demais ligantes já que demonstrou temperaturas mais elevadas para o item estudado, o que representa a capacidade do ligante de resistir a deformações permanentes e temperaturas de serviço elevadas. Além disso, a análise *Tukey-Kramer* demonstrou que existem diferenças estatísticas significantes entre as médias do HiMA e dos demais ligantes, o que confirma esta superioridade.

4.4 PONTO DE FULGOR

Foram ensaiados três corpos de prova de cada ligante para determinação do seu Ponto de Fulgor. A Tabela 17 apresenta os resultados do ensaio, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A Análise da Variância ANOVA obtida através do *software Statgraphics® Plus 4.1* está apresentada na Tabela 18.

Tabela 17 - Resultados Ensaio Ponto de Fulgor

LIGANTE	UNIDADE	LIMITES		CP	VALORES (°C)	MÉDIA (°C)	Sd (°C)	CV (%)
		MÍNIMO	MÁXIMO					
50/70	°C	235,0	-	CP1	286,0	286,67 B	25,01	8,72
				CP2	312,0			
				CP3	262,0			
55/75	°C	235,0	-	CP1	304,0	308,00 AB	3,46	1,12
				CP2	310,0			
				CP3	310,0			
HiMA	°C	235,0	-	CP1	325,0	321,67 A	2,89	0,90
				CP2	320,0			
				CP3	320,0			

Fonte: Autoria Própria

Nota: De acordo com o resultado do teste *Tukey-Kramer*, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; CV: Coeficiente de Variação.

Tabela 18 - Análise da Variância ANOVA Ponto de Fulgor

FONTE DA VARIAÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	FUNÇÃO F	P-VALOR
Explicada	1866,89	2	933,444	4,34	0,0684
Não Explicada	1291,33	6	215,222		
Total	3158,22	8			

Fonte: Autoria Própria

Nota: Se o P-valor é superior ou igual 0,05 (5%) não existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

Como esperado, o resultado do ponto de fulgor do ligante HiMA se apresentou superior ao requerido por norma. A análise *Tukey-Kramer* demonstrou que não existem diferenças estatísticas significantes entre as médias do HiMA e do CAP 55/75, porém, todos os ligantes ensaiados estão acima da temperatura mínima de segurança estando desta forma aprovados no ensaio.

4.5 RECUPERAÇÃO ELÁSTICA

O ensaio de Recuperação Elástica foi realizado com auxílio do Ductilômetro modificado. De acordo com a norma NBR 6576 (ABNT, 2007), o ensaio só deve ser realizado em CAPs modificados por polímero, desta forma só foram ensaiados o CAP 55/75 e o CAP HIMA. Na Tabela 19 são apresentados os resultados do ensaio, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A Análise da Variância ANOVA obtida através do *software Statgraphics® Plus 4.1* está apresentada na Tabelas 20.

Tabela 19 - Resultados Ensaio Recuperação Elástica

LIGANTE	UNIDADE	LIMITES		CP	VALORES (%)	MÉDIA (%)	Sd (%)	CV (%)
		MÍNIMO	MÁXIMO					
55/75	%	75,0	-	CP1	88,40	88,50 B	0,10	0,11
				CP2	88,50			
				CP3	88,60			
HiMA	%	80,0	-	CP1	98,00	98,17 A	0,29	0,29
				CP2	98,50			
				CP3	98,00			

Fonte: Autoria Própria

Nota: De acordo com o resultado do teste *Tukey-Kramer*, letras diferentes na coluna das médias indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95% de nível de confiança; CV: Coeficiente de Variação.

Tabela 20 - Análise da Variância ANOVA Recuperação Elástica

FONTE DA VARIACÃO	SOMA DOS QUADRADOS	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADOS MÉDIOS	FUNÇÃO F	P-VALOR
Explicada	140,167	1	140,167	3003,57	0,0000
Não Explicada	0,186667	4	0,0466667		
Total	140,353	5			

Fonte: Autoria Própria

Nota: Se o P-valor é inferior a 0,05 (5%) existem diferenças estatísticas significantes entre as médias a um nível de confiança de 95%.

O resultado de recuperação elástica do novo ligante se apresentou superior ao ligante modificado 55/75. A análise *Tukey-Kramer* demonstrou que existem diferenças estatísticas significantes entre as médias do HiMA e dos demais ligantes, o que confirma a superioridade. A recuperação elástica apresentada pelo ligante HiMA sugere um melhor desempenho à fadiga da mistura asfáltica, que o utiliza na sua composição.

Espera-se que a mistura composta a partir do HiMA tenha desempenho à fadiga superior ao da mistura composta pelo ligante 55/75, já que o ligante HiMA possui demonstrou maior capacidade elástica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados, dos ensaios realizados em laboratório, mostram que o Ligante HiMA atende às principais normas de classificação nacionais, atendendo aos limites definidos para ligantes modificados, e também apresenta melhores resultados quando comparado a dois dos principais ligantes utilizados no país, o CAP 50/70 e o CAP 55/75.

A adição dos polímeros na matriz asfáltica do CAP HiMA, concede ao ligante asfáltico as mesmas propriedades combinadas com maior capacidade elástica, evidenciada pela recuperação elástica de 98,17%.

Com a melhoria das características do ligante asfáltico, espera-se que a mistura realizada com o HiMA tenha melhor desempenho em relação à deformação permanente, que resulta em defeitos como o afundamento de trilha de roda, e também melhor desempenho à fadiga, além do ligante ter melhor performance em temperaturas mais elevadas, o que foi comprovado com o ensaio de viscosidade. Com essas melhorias comprovadas, as manutenções e reformas precoces serão mais raras, trazendo assim avanços ao mercado da pavimentação.

Para uma avaliação mais completa dos resultados encontrados sugere-se a realização de ensaios envolvendo dosagem de corpos de prova de CBUQ e o levantamento da viabilidade econômica do novo ligante.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS **Resolução Anp Nº 19**, 2005. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/?dw=79195>>. Acesso em: 14/06/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS **Resolução Anp Nº 32**, 2010. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2/asfalto>>. Acesso em: 14/06/2018.

AMARAL, Simone da Costa. **Estudos de Misturas Asfálticas Densas com Agregados do Estado do Pará, Utilizando Asfalto Convencional (CAP-40) e Asfalto Modificado Com Polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2000. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ANUT - **Associação Nacional dos Usuários de Transporte de Carga**. Disponível em:<<http://www.anut.org>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS (ABEDA) (Paraná). **Asfaltos Modificados por Polímeros: Curitiba**, 2007. 138 slides, color.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

_____. **NBR14950/2003**. Materiais betuminosos - Determinação da Viscosidade Saybolt Furol. 2003.

_____. **NBR15184/2004**. Materiais betuminosos - Determinação Da Viscosidade Em Temperaturas Elevadas Usando Um Viscosímetro Rotacional. 2004.

_____. **NBR6576/2007**. Materiais Asfálticos - Determinação da Penetração. 2007.

_____. **NBR 6560/2000**. Materiais Asfálticos – Determinação de Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola. 2000.

_____. **NBR11341/2014**. Derivados De Petróleo - Determinação dos Pontos de Fulgor e de Combustão em Vaso Aberto Cleveland. 2014.

_____. **NBR15086/2006**. Materiais Betuminosos - Determinação da Recuperação Elástica pelo Ductilômetro. 2006.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2010. 501 p.

BŁAŻEJOWSKI, K.; OLSZACKI, J.; PECIAKOWSKI, H. **Highly modified binders orbiton HiMA**. 2015. Disponível em: <http://www.asfaltovevozovky.cz/av2015/data/prezentace/t1-2_blazejowski.pdf>. Acesso em 10/05/2018

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; REIS, Rafael Marçal Martins de. **Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico**. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2011. 152 p.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; BERNUCCI, Liedi Bariani; SOARES, Jorge Barbosa. **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. Rio de Janeiro: Abeda, 2015. 146 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Breve Histórico do Rodoviarismo Federal no Brasil**. 2001. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/historico/>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

_____. **DNIT - 005/2003 – TER**. Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos - Terminologia. Rio de Janeiro, 2003. 12 p.

_____. **DNIT - 095/2006 – EM**. Cimentos Asfálticos de Petróleo - Especificação de Material. Rio de Janeiro, 2006. 6 p.

FONTANA FILHO, Antônio. **Análise Laboratorial de Misturas Asfálticas Abertas Usinadas a Quente com a Utilização de Diferentes**. 2009. 248 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GRECO, Jisela Aparecida Santanna. **Avaliação da Influência de Alguns Fatores nas Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Densas, à Luz da Técnica de Planejamento e Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários Assimétricos**. 2014. 340 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GUSMÃO, Márcio. **Restauração Rodoviária Usando Asfalto Modificado por Polímero**. 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

INFRAESTRUTURA URBANA. **Asfalto modificado**. 2017. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/33/asfalto-modificado-usada-em-recapeamentos-e-tratamento-de-superficies-301429-1.aspx>>. Acesso em 15/06/2018.

LIMA, Adauto José Miranda. **Engenharia de Avaliações**. 348 p. Apostila dos cursos de graduação em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MONTANARI, Rodrigo Marques. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas a Frio e a Quente Para Fins de Pavimentação de Vias**. 2007. 97 p. Dissertação (Pós-Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

MOTTA, Laura Maria Goretti da; ODA, Sandra; FERNANDES, Mônica. **Análise da Adição de Polímero SBR em Materiais para Pavimentação Asfáltica**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 2011. 11 p.

NEGRÃO, Douglas Polcaro. **Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do Tipo RET para Aplicações em Pavimentos**. 2006. 157 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transporte, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NOGUEIRA, Mônica Grassi. **Comparação do Comportamento em Campo de Concretos Asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para Revestimentos de Pavimentos**. 2008. 168 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PAIS, Jorge. **Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis**. 1999. 262 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 1999.

PETROBRÁS. **Refinarias**: Conheça Nossas Refinarias no Brasil. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

PREGO, Atahualpa Schmitz da Silva. **A Memória da Pavimentação no Brasil: Fatos Históricos, Recordações, Depoimentos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001. 640 p.

REIS, Rafael Marçal Martins; MARTINS, Rafael L.; MALTA, Yan Gorski de Campos; RAFFLER, Andréia; SENDESKI, Aline; NEGRELLI, Elton. **Avaliação do Efeito de Ligantes Asfálticos Modificados na Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 2016. 9 p.

ROHDE, Luciana. **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos**. 2007. 250 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SILVA, Allan Monteiro. **Avaliação do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas Projetadas com CAP HiMA e CAP 60/85-e Aplicadas na Restauração de um Trecho da Rodovia SC-114**. 2018. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SINICESP – Sindicato da Construção Pesada do Estado de São Paulo (São Paulo). **O Papel da PETROBRAS na Cadeia Produtiva de Asfaltos**. 2012. Disponível em: <<http://www.sinicesp.com.br/materias/2012/bt03a.htm>>. Acesso em: 13 out. 2017.

TINAJEROS, Reynner Andre Paredes. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Convencional e Modificada com Polímero**. 2016. 145 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

ZEGARRA, Jorge Rodolfo Escalante. **Avaliação de Misturas Produzidas com Ligantes Asfálticos Peruanos Convencional PEN 60/70 e Modificados por Polímero SBS Tipo I 60/60 e PG 76 - 22.** 2007. 234 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007