

ANÁLISE DE DIFERENTES TIPOS DE MASSAS ASFÁLTICAS QUENTES PELA METODOLOGIA MARSHALL COM LIGANTES ASFÁLTICOS VARIADOS

Douglas Santos da Silva¹, Letícia Ferreira Couto¹, Lucas Batista Loures Bonfim¹ e Sérgio Júnio Lima Conceição¹

douglassilva.mg@gmail.com; lucasblb123@yahoo.com; sergioconceicao.lima@gmail.com e leticia.couto18@gmail.com

¹ Graduação em Engenharia Civil – Centro Universitário UNA.

Professora orientadora: Luana Maris Pedrosa Cruz Ercan

Coordenação de curso de Engenharia Civil:

Resumo: Estudo realizado em uma distribuidora de produtos asfálticos com o intuito de evidenciar as diferenças existentes nos resultados encontrados nas massas asfálticas usinadas a quente, compactadas e não compactadas, utilizando para essa finalidade os espaços, equipamentos, ligantes asfálticos e agregados fornecidos pela distribuidora, no qual o grupo conduziu e participou na geração dos resultados durante todo o processo. A metodologia seguida para essa finalidade foi o Ensaio Marshall, baseado na Norma DNER 043/95, comparando resultados obtidos de volumetria, teor ótimo de cimento asfáltico, estabilidade, densidade e tração dos diversos ligantes. Os resultados mostram que existem diferenças na massa asfáltica usinada quando utilizado diferentes ligantes em condições controladas, sendo verificado por meio da volumetria, das propriedades mecânicas e também na reologia. Esses resultados são de cunho comparativo, não havendo a possibilidade de determinar o melhor ligante entre todos, somente evidenciar que realmente existem diferenças e em quais pontos essas diferenças são benéficas ou não para a pavimentação.

Palavras-chave: Cimento. Betume. Dosagem.

1 INTRODUÇÃO

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é uma mistura composta principalmente por hidrocarbonetos pesados, sendo obtido pela extração e refino do petróleo cru, contendo ou não a adição de agente modificadores (MOTHÉ, 2009). São materiais com características termoplásticos, aglutinantes, termo sensíveis, coloides e que tem alta resistência a maioria dos ácidos e bases. Sua aplicação se mostrou bastante eficaz no campo da pavimentação estando em associação com agregados, podendo o cimento asfáltico ser utilizado de forma virgem, modificado ou em associação com emulsificantes dispersos em fase aquosa (FERNANDES, 2009).

Segundo Bernucci (2006) houve a necessidade da criação de normas e métodos para validar a qualidade do produto, principalmente para definir sua dosagem ideal no ramo de pavimentação, garantindo o desempenho e durabilidade do pavimento no qual são empregados.

Um dos métodos mais utilizados para verificar a dosagem de cimento asfáltico no Brasil é o Método Marshall, o qual tem como princípio levantar dados sobre o comportamento de agregados e ligantes de massas asfálticas usinadas a quente, compactadas e não compactadas, em ensaios que validem as propriedades mecânicas e a volumetria do pavimento (SOARES et. al., 2000).

Nesse trabalho avaliou-se o comportamento de diversos tipos de massas asfálticas compactadas e não compactadas produzidas por diferentes ligantes, seguindo as instruções da DNER 043/95 e DNIT 031/2006. O espaço utilizado para a confecção das massas asfálticas, os testes conduzidos, os ligantes e os agregados foram fornecidos pela própria distribuidora de ligantes asfálticos, na qual um dos integrantes do grupo atua, participando no processo de

geração e tratamento dos dados. O objetivo principal foi de evidenciar as diferenças existentes entre as massas asfálticas geradas por diferentes ligantes, não havendo uma conclusão de qual seria o melhor ligante, devido a essa resposta estar associada à sua aplicabilidade específica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A confecção das massas asfálticas usinadas a quente compactadas e não compactadas envolve processos que circundam sua qualidade em todo o percurso, desde os tipos de agregados escolhidos até a dosagem entre agregado e ligante em determinada temperatura. Esses processos envolvem análises e ensaios de cada componente do projeto de forma individual, no qual seus resultados ao serem comparados com normas e diretrizes seguidas permite verificar, em primeiro momento, o enquadramento dos componentes. Partindo dessa confirmação, é possível iniciar a mistura entre componentes e verificar o resultado final da massa asfáltica.

2.1 Ligantes Asfálticos

O fluxo crescente de locomoção de pessoas e mercadorias entre cidades ao longo da história impulsionou o desenvolvimento e aprimoramento das atividades relacionadas a pavimentação, com o intuito de gerar conforto e segurança no deslocamento (ZATARIN et al., 2017). Relatos históricos mostram a menção do uso de asfalto para pavimentação de estradas de 625-604 a.C. na Babilônia, sendo essas estruturas estradas confeccionadas de blocos de pedra e tijolos recobertos por material betuminoso de origem natural (LESUEUR, 2009).

A utilização desses materiais, conforme Zatarin et al (2017), são ligados aos pensamentos de utilização de múltiplas camadas do pavimento (revestimento, base, sub-base, subleito e reforço de subleito), as quais devem suportar adequadamente os esforços oriundos de cargas e ações climáticas sem sofrer processos de degradação e desgaste prematuros.

Segundo Mothé (2009), os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) são ligantes que podem apresentar, ou não, adição de agentes modificadores de tamanho máximo de 250 µm. Os ligantes podem ser do tipo asfalto natural, asfalto de petróleo alcatrão. Os CAP's podem ser divididos em basicamente dois tipos: aqueles que apresentam sua destinação na pavimentação e os destinados a processos industriais, na formação de emulsões asfálticas ou asfaltos modificados.

O termo betume muitas vezes é encontrado no lugar de asfalto, mas não há divergências no significado, sendo sua terminologia diferente com base da corrente seguida: europeia é tratado como betume; americana como asfalto, cimento asfáltico ou cimento asfáltico de petróleo (ESS, 2000).

Conforme Shell (2003) evidencia, a composição química do cimento asfáltico depende da Fonte e do processo de refino do óleo cru, o que resulta em teores diferentes de frações de destiláveis e resíduo de vácuo.

O asfalto pode ser definido como um material aglutinante, composto não volátil, insolúvel em água, podendo estar presente no petróleo cru, ou presente em jazidas de forma natural, solúvel em tolueno e termo sensíveis semissólidos a temperatura ambiente. (Mothé, 2009).

De acordo com Fernandes (2009), os ligantes asfálticos de petróleo são amplamente utilizados na área da construção civil em diversas atividades, como impermeabilizantes, compostos para proteção contra corrosão e na pavimentação, funcionando como protetor das superfícies contra danos gerados pela penetração de água e pressão dos veículos, e possibilitar a união dos componentes de uma mistura de agregados de forma coesa.

As normas DNIT 129/2011 e DNIT 095/2006 estabelecem os limites para enquadramento dos diversos tipos de ligantes existentes, cada qual com sua norma específica, sendo esses ensaios listados a seguir:

- Determinação da Peneira (NBR 14393/2012);
- Ductilidade (NBR 6293/2015);
- Recuperação Elástica (DNIT ME 130/2010);
- Ponto de Amolecimento (NBR 6560/2016);
- Viscosidade Brookfield (NBR 15184/2021);
- Penetração (NBR 6576/2007);
- Índice de Susceptibilidade Térmica (DNIT ME 095/2006);
- Efeito de Calor e do Ar – RTFOT (D 2872/97);
- Variação de Massa (DNIT ME 095/2006);
- Ensaio do PG - *performance grade* (ASHTO – T315-19);
- Ensaio do LAS - *Linear Amplitude Sweep* (DNIT ME 439/2022);
- Ensaio do MSCR - *Multiple Stress Creep and Recovery* (DNIT ME 423/2020).

2.2 Agregados

Segundo Woods (1960), agregado é uma mistura de diversos materiais minerais, como pedregulho, areia, pedra britada, podendo ser utilizados em combinação com um ligante para formar concreto, uma argamassa, uma massa asfáltica. Sua classificação pode ser por diversos tipos, estando associado geralmente quanto a natureza, ao tamanho e a graduação.

O pavimento asfáltico finalizado tem sua qualidade entrelaçada diretamente a boa conexão entre os seus componentes: os agregados e os ligantes. Os agregados correspondem à aproximadamente 93 a 97% do peso da mistura asfáltica, sendo esse um dos motivos da necessidade da dosagem adequada dos componentes de uma mistura asfáltica (SOARES et al., 2000).

A norma DNIT 031/2006 estabelece os ensaios e valores que devem estar enquadrados os agregados que serão utilizados em qualquer pavimento do tipo CBUQ na metodologia Marshall, sendo listados os ensaios:

- Determinação do Teor de Pulverulentos (DNER ME 266/97);
- Adesividade (DNER ME 078/94 e DNER ME 079/94);
- Determinação da Abrasão “*Los angeles*” (DNER ME 035/98);
- Determinação do Índice de Forma (DNER ME 086/94);
- Avaliação da Durabilidade (DNER ME 089/94);
- Equivalente de Areia (DNER ME 054/97);
- Densidade Relativa (DNIT ME 413/2021, DNIT ME 411/2021 e DNIT ME 428/2022);
- Granulometria (DNER ME 083/98);
- Ensaio Marshall (DNER ME 043/95);
- Densidade Relativa Aparente (DNIT ME 427/2020);
- Estabilidade Marshall (DNER 043/95);
- Resistência a Tração por compressão Diametral (DNIT ME 136/2018).

2.3 Composição Granulométrica

Entender sobre o conceito de granulometria dos agregados e que a composição de materiais com diferentes tamanhos e formatos exerce influência nas propriedades de resistência mecânica das misturas é fundamental para obtenção de massas de boa qualidade (WEIDMANN, 2008).

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), a granulometria para metodologia de pavimentos flexíveis tem relação direta com a composição do concreto asfáltico. A norma estabelece quais são os valores limites de tolerância para haver o enquadramento do material, conforme Figura 01, evidenciando quais são os

percentuais do ligante asfáltico determinados pelo projeto da mistura no qual o agregado estiver sendo enquadrado.

Figura 01 – Quadro com especificação granulométrica

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT ME 031/2006.

Askeland (1998) descreve a importância da realização de estudos quando ocorre a mistura de materiais distintos, os quais quando unidos, apresentam características divergentes de sua origem, como é o caso da massa asfáltica, cimento asfáltico com agregados.

2.4 Dosagem

Segunda a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003), a dosagem de uma mistura asfáltica é a escolha de um teor de ligante, devidamente aprovado através de métodos experimentais, em associação a agregados que apresentam enquadramento em faixas granulométricas predefinidas para cada tipo de pavimentação. Na literatura existem diversos métodos de dosagem, podendo ser o Método Triaxial Smith, Hubbard-Field, Hveem e Marshall.

No método Triaxial Smith os corpos de prova são confinado e sofrem pressão em suas laterais e recebem carga na vertical, condição essa semelhante a situação existente em campo (SENÇO, 2001).

Segundo Hirsh (2007), o método Hubbard-Field foi um dos pioneiros para avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, a estabilidade. Nesse ensaio ocorre aplicação de carga através de um orifício circular contendo um corpo de prova não confinado.

O ensaio que se assemelha de forma mais assertiva ao adensamento que ocorre com a mistura em campo é o método de *Hveem*, o qual analisa a estabilidade e densidade da mistura, o que permite verificar a resistência ao inchamento em água. O método permite avaliar o atrito interno da resistência ao cisalhamento em comparação com a deformação lateral em situações que ocorre aplicação de carga vertical, verificando o comportamento mecânico da mistura. (MOTTA et al., 1996).

2.5 Método Marshall

Dos diversos métodos de dosagens, o considerado atualmente mais acessível e mundialmente utilizado é o método de compactação por impacto, conhecido como Método

Marshall, em homenagem a seu inventor em meados de 1940, Engenheiro Bruce Marshall. A Metodologia Marshall é baseada nos resultados obtidos através da análise de corpos de prova compactados e não compactados, gerando valores de volumetria, estabilidade e fluência a diferentes dosagens de ligante, verificando sua resistência ao surgimento das deformações geradas pelo tráfego (SOARES et. al.,2000).

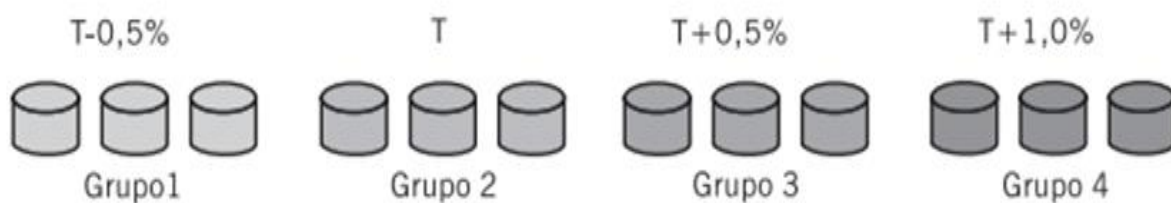
De acordo com Leandro (2016), o ensaio se caracteriza como um método que utiliza corpos de prova cilíndricos metálicos e compactação com soquete, o qual cai livremente de uma determinada altura, na qual ocorre a aplicação de 5000 libras de carga estática, que tem como finalidade nivelar o corpo de prova aprisionado dentro desses cilindros. O corpo de prova apresenta quantidade de materiais definida segundo diretrizes, e sua temperatura está acima de 100 °C. Após esse nivelamento, o corpo de prova é aferido quanto sua altura e diâmetro, antes de ser realizado ensaios específicos para verificação da qualidade da massa asfáltica compactada.

Segundo Vilela (2018), houve alteração na forma de obtenção da dosagem, não levando em consideração somente os parâmetros de estabilidade e fluência. Atualmente o teor de projeto de ligante asfáltico na dosagem Marshall está relacionado a parâmetros volumétricos, principalmente volume de vazios (V_v) e relação betume vazios.

O teor de ligante a ser escolhido deve seguir os normativos de forma criteriosa, pois esse tem grande influência na qualidade do pavimento: o excesso de ligante causará deformações do revestimento com a ação do tráfego e a falta de ligante acarretará um pavimento pouco durável, permeável, sujeito à fissuração e sem resistência ao desgaste superficial (LEANDRO, 2016).

De acordo com Bernucci et al (2022), para a seleção do teor ótimo de cimento asfáltico é necessário começar a preparação de pelo menos 16 corpos de prova, nos quais serão verificados altura, diâmetro e densidade aparente da mistura compactada. Cada grupo deve ter um teor diferente de CAP (teor de asfalto efetivo), sendo a definição de teores de segundo a regra ilustrada pela Figura 02.

Figura 02– Definição teor de asfalto efetivo



Fonte: BERNUCCI et al., 2022.

Segundo Soares et al. (2000), o teor ótimo do cimento asfáltico pode ser selecionado através dos resultados obtidos de uma série de valores limites estabelecidos em norma. Esses valores têm relação direta com a volumetria do material, tendo destaque o volume de vazios (V_v), relação betume vazio (RBV) e vazios agregados minerais (VAM). Para a seleção do teor ótimo é verificado o enquadramento segundo a norma DNIT 2006, conforme a Figura 04.

Figura 03 – Quadro com especificações volumétricas

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)	VAM – Vazios do Agregado Mineral		
				Tamanho Nominal Máximo do agregado		VAM Mínimo %
				#	m m	
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6	1½"	38,1	13
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72	1"	25,4	14
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500	¾"	19,1	15
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65	1/2"	12,7	16
				3/8"	9,5	18

Fonte: DNIT ME 031/2006.

Segundo Coelho (2013), a falta de estudos comparativos entre os cimentos asfálticos disponíveis pode explicar a existência de defeitos ligados a estrutura do pavimento. Os estudos específicos utilizando uma das metodologias revela o teor ótimo de trabalho para determinado ligante, sendo o comparativo comprovante do melhor desempenho de cada ligante nas condições em que será utilizado.

3 METODOLOGIA

Os resultados obtidos são baseados em ensaios e análises técnicas realizadas por um dos integrantes do grupo, o qual trabalha no setor de Pesquisa e Desenvolvimento na distribuidora de ligantes asfálticos alvo do estudo, a Emam Asfaltos. O início dos estudos é na data de 19/06/2023, período no qual ocorreu coleta e recebimento dos agregados para o início dos ensaios. Ao todo foram utilizados 11 ligantes asfálticos, os quais serviram para a confecção de 300 massas asfálticas usinadas a quente. Para permitir a obtenção de dados de forma coesa, ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, as amostras estudadas seguiram certas premissas:

- Os agregados utilizados são provenientes da mesma pedreira, localizada na região de Juiz de Fora/MG;
- Os ligantes utilizados foram analisados antes da confecção da massa asfáltica a quente;
- As temperaturas de controle das massas usinadas a quente foram semelhantes, sendo ± 150 °C agregado e ± 135 °C ligante;
- O material foi enquadrado para a utilização como uma camada de ligação (binder).

O caminho seguido para o desenvolvimento do estudo foi inicialmente a escolha e coleta dos tipos de materiais que serão utilizados. A Tabela 01 traz à tona os tipos de materiais e a localização da pedreira. Devido ao sigilo de informações, o nome da pedreira não pode ser informado, estando permitido somente o nome dos materiais e sua localização.

Tabela 1.0 – Agregados utilizados no estudo

TIPO DE MATERIAL	LOCALIZAÇÃO DA PEDREIRA
BRITA 01	Juiz de Fora / MG
BRITA 00	Juiz de Fora / MG
PÓ DE BRITA	Juiz de Fora / MG
AREIA INDUSTRIAL	Juiz de Fora / MG

Fonte: Autores (2023)

Para a determinação de qual material será analisada para qual tipo de ensaio, ao consultar as normas citadas no referencial teórico foi acordado entre os membros do grupo a realização dos seguintes ensaios:

1. Ensaio de Equivalente de Areia para o Pó de Brita;
2. Índice de Forma para a Brita 01;
3. Desgaste Los Angeles realizado na Brita 00;
4. Durabilidade realizada na Brita 00;
5. Densidade Relativa Real, Aparente e absorção de água para todos os materiais;
6. Granulometria Individual dos materiais.

Com relação aos limites para aceitação dos resultados, a Tabela 02 descreve os valores mínimos e máximos para alguns dos ensaios descrito anteriormente. Valores de absorção e densidade não apresentam limites, e a granulometria em um projeto asfáltico é considerada somente da junção de todos os materiais.

Tabela 2.0 – Ensaios e seus respectivos valores para aceitação dos agregados

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS				
MÉTODOS	TIPOS DE ENSAIO	UNIDADE	ESPECIFICAÇÕES	
			LIM. MÍNIMO	LIM. MÁXIMO
DNER-ME 054/97	Equivalente de Areia	%	≥ 55	-
DNER-ME 086/94	Índice de Forma	Adimensional	$> 0,5$	-
DNER-ME 035/98	Desgaste Los Angeles	%	-	≤ 50
DNER-ME 089/94	Durabilidade (Sol. Sulfato de Sódio)	%	-	< 12

Fonte: DNIT 031/2006

No segundo momento houve a definição de quais seriam os ligantes asfálticos utilizados para o desenrolar do estudo, estando esses descritos na Tabela 03. Os ligantes do tipo CAP Convencional foram cedidos pela distribuidora de ligantes asfálticos, e o tipo CAP Modificado e Asfalto Morno foram produzidos dentro do laboratório da distribuidora de ligantes asfálticos por um dos integrantes do grupo.

Tabela 3.0 – Ligantes utilizados no estudo com seus respectivos grupos.

CAP CONVENCIONAL	CAP MODIFICADO	ASFALTO MORNO
CAP 30-45	CAP 50-70 AD	ASWM Distribuidora
CAP 50-70	55/75 E	ASWM Cliente
CAP 70-85	60/85 E	
BLEND (50/50)	65/90 E	
CAP IMPORTADO		

Fonte: Autores (2023)

Para a verificação das características dos ligantes asfálticos, foram realizados os ensaios descritos segundo as normas DNIT 095/2006 e DNIT 126/2011. A divisão dos ligantes em três grandes grupos facilita a visualização dos tipos de ensaios a serem analisados e as especificações, conforme a Tabela 04 e Tabela 05. O asfalto morno apresenta suas características entrelaçadas ao ligante de origem, no caso desse estudo, o CAP 50-70.

Tabela 4.0 – Ensaio e seus respectivos valores para aceitação dos ligantes convencionais

ENSAIOS DO LIGANTE ASFÁLTICO – CAP CONVENCIONAL						
ENSAIOS PARA O LIGANTE	MÉTODO	UN.	ESPECIFICAÇÃO			
			CAP 30-45		CAP 50-70	
			LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.	LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.
Penetração a 25 °C (100g e 5s)	NBR 6576:2007	mm	30	45	50	70
Ponto de amolecimento, mín.	NBR 6560:2016	°C	52	-	46	-
Viscosidade Brookfield a 135° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	374	-	274	-
Viscosidade Brookfield a 150° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	203	-	112	-
Viscosidade Brookfield a 177° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	76	285	57	285
Índice de Susceptibilidade Térmica	DNIT 095/2006 ME	°C	-1,5	0,7	-1,5	0,7
Ductilidade a 25° C, mín.	NBR 6293:2015	mm	60	-	60	-

EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163 °C, 85 MIN	MÉTODO	UN.	ESPECIFICAÇÃO			
			CAP 30-45		CAP 50-70	
			LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.	LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.
Variação de Massa	DNIT 095/2006	%	-	0,5	-	0,5
Variação do Ponto de Amolecimento, °C, máx.	NBR 6560:2016	°C	-	8	-	8

Fonte: DNIT 095/2006

Tabela 5.0 – Ensaio e seus respectivos valores para aceitação dos ligantes modificados

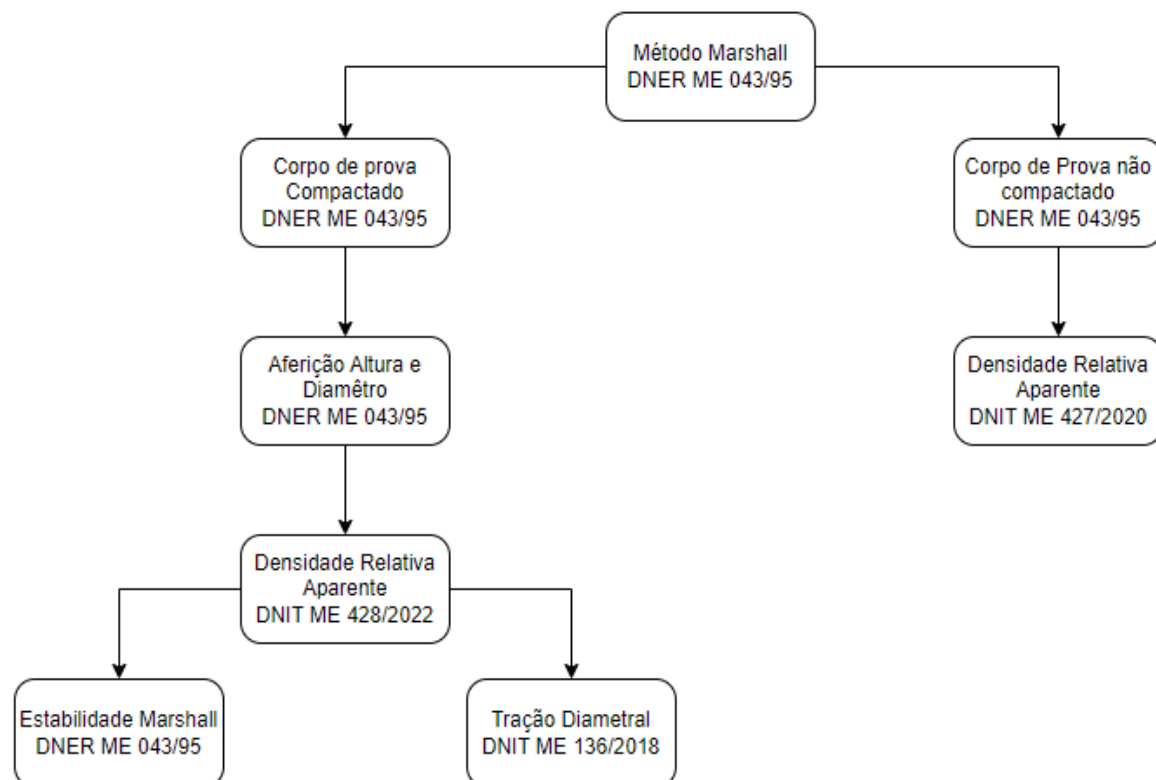
ENSAIOS DO LIGANTE ASFÁLTICO – CAP MODIFICADO								
ENSAIOS PARA O LIGANTE	MÉTODO	UN.	ESPECIFICAÇÃO					
			55/75 E		60/85 E		65/90 E	
			LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.	LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.	LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.
Penetração a 25 °C (100g e 5s)	NBR 6576:2007	mm	45	70	40	70	40	70
Ponto de amolecimento, mín.	NBR 6560:2016	°C	55	-	60	-	65	-
Viscosidade Brookfield a 135° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	-	3000	-	3000	-	3000
Viscosidade Brookfield a 150° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	-	2000	-	2000	-	2000
Viscosidade Brookfield a 177° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	-	1000	-	1000	-	1000
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm	NBR 15086:2022	%	75	-	85	-	90	-

EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163 °C, 85 MIN	MÉTODO	UN.	ESPECIFICAÇÃO					
			55/75 E		60/85 E		65/90 E	
			LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.	LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.	LÍM. MÍN	LÍM. MÁX.
Variação de Massa	ASTM D 2872	%	-	1	-	1	-	1
Variação do Ponto de Amolecimento, °C, máx.	DNIT 095/2006 ME	°C	-5	7	-5	7	-5	7

Fonte: DNIT 129/2011

Com a definição dos materiais e ligantes a serem estudados, a metodologia Marshall começou a ser utilizado de forma prática, onde cada ligante passou pelo processo ilustrado no Diagrama 1.0. Para o processo de confecção dos corpos de prova compactados e não compactados, o integrante do grupo que atua na empresa realizou a confecção e análise de cada corpo de prova, estando os integrantes responsáveis pela aferição da altura e diâmetro.

Diagrama 01 – Percurso para obtenção dos resultados da metodologia Marshall.



FONTE: Autores (2023)

Os resultados obtidos nos corpos de prova compactados apresentam valores e limites definidos pela norma DNIT 031/2006, estando esses apresentados na Tabela 06.

Tabela 6.0 – Ensaios e seus respectivos valores para aceitação dos ligantes modificados

CARACTERIZAÇÃO DA MASSA ASFÁLTICA				
MÉTODOS	TIPOS DE ENSAIO	UNIDADE	CAMADA DE LIGAÇÃO (BINDER)	
			LIM. MÍNIMO	LIM. MÁXIMO
DNIT 031/2006	Teor Recomendado	%	4,5	9
DNER 043/95	VV - Volume de vazios	%	3	5
DNIT 031/2006	VAM - Vazios do agregado mineral	%	15	15
DNER 043/95	RBV - Relação Betume/vazios	%	75	82
DNER 043/95	Estabilidade, 75 golpes	Kgf	500	500
DNIT 136/2018	Resistência à tração por Compressão Diametral, 25 °C	Mpa	0,65	0,65

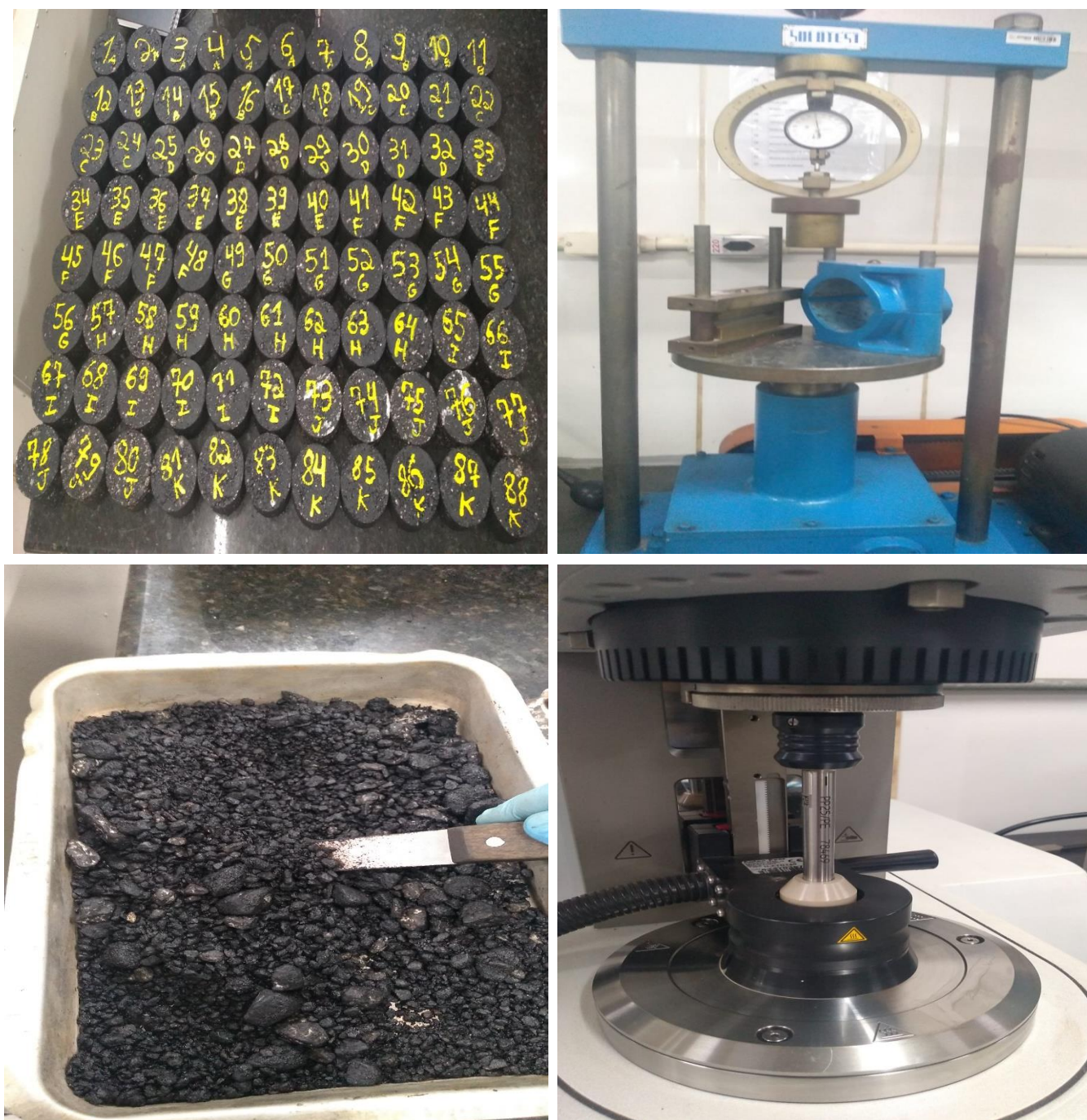
Fonte: DNIT 031/2006

Com base em toda a metodologia abordada, foi possível realizar as etapas de resultados e discussões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma dosagem adequada no Ensaio Marshall é necessário a realização de diversos ensaios que verifiquem a integridade do agregado, do ligante e também da massa asfáltica compactada ou não compactada. A definição de aceitação dos resultados foi baseada segundo a norma DNIT 031/2006 em associação com a DNER.

Figura 4.0 – Parte do acervo fotográfico do grupo.



Fonte: Autores (2023)

Os resultados a serem apresentados são referentes as análises realizadas por um dos integrantes do grupo, o qual participa de forma integral a equipe da distribuidora de ligantes asfálticos, liderando o setor de Pesquisa e Desenvolvimento. Os valores, discussões e tabelas apresentadas foram criados para estudo de caso dos ligantes analisados nesses últimos 4 (quatro) meses.

4.1 Agregados

Com relação aos resultados dos agregados utilizados, a Tabela 07 refere-se aos valores encontrados e as normas seguidas para cada ensaio:

Tabela 7.0 – Resultados encontrados para os agregados

CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS			
MÉTODOS	TIPOS DE ENSAIO	UNIDADE	RESULTADOS
DNER-ME 054/97	Equivalente de Areia	%	63
DNIT 413/2021 ME Material Graúdo BRITA 1	Gsa - Densidade Relativa Real	Adimensional	2,811
	Gsb - Densidade Relativa Aparente	Adimensional	2,768
	Absorção de Água	%	0,6
DNIT 413/2021 ME Material Graúdo BRITA 0	Gsa - Densidade Relativa Real	Adimensional	2,724
	Gsb - Densidade Relativa Aparente	Adimensional	2,645
	Absorção de Água	%	1,1
DNIT 411/2021 ME Material Miúdo PÓ DE BRITA	Gsa - Densidade Relativa Real	Adimensional	2,8
	Gsb - Densidade Relativa Aparente	Adimensional	2,788
	Absorção de Água	%	0,2
DNIT 411/2021 ME Material Miúdo AREIA	Gsa - Densidade Relativa Real	Adimensional	2,783
	Gsb - Densidade Relativa Aparente	Adimensional	2,725
	Absorção de Água	%	0,8
DNIT 425/2020 ME	Índice de Lamelaridade	Adimensional	2
DNER-ME 035/98	Desgaste Los Angeles	%	16
DNER-ME 089/94	Durabilidade (Sol. Sulfato de Sódio)	%	3,97

FONTE: Autores (2023)

Os valores obtidos dos agregados estão dentro do normativo, não impedindo sua utilização. Os ensaios com relação a densidades e absorção não apresentam valores limites entre mínimo e máximo, devido a cada tipo de agregado apresentar um valor específico.

4.2 Ligantes Asfálticos

4.2.1 Convencional

A Tabela 08 consta com os resultados encontrados para os ligantes classificados como CAP Convencional segundo a norma DNIT EM 095/2006, estando em destaque na coloração amarela aqueles que se encontram fora da faixa de especificação.

Tabela 8.0 – Resultados encontrados para os ligantes asfálticos convencionais.

ENSAIOS DO LIGANTE ASFÁLTICO – CAP CONVENCIONAL							
ENSAIOS PARA O LIGANTE	MÉTODO	UN.	RESULTADOS DO ESTUDO				
			CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 70-85	BLEND 50/50	CAP IMPORTADO
Penetração a 25 °C (100g e 5s)	NBR 6576:2007	mm	32,33	53,68	60	48	40,2
Ponto de amolecimento, mín.	NBR 6560:2016	°C	52,5	47,5	49	51	55,5
Viscosidade Brookfield a 135° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	730	355	240	547,5	407
Viscosidade Brookfield a 150° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	336	179	126	298	196
Viscosidade Brookfield a 177° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	122	66,5	51	121,5	71,5
Índice de Susceptibilidade Térmica	DNIT 095/2006 ME	°C	-1,5069	-1,6800	-1,0229	-1,0396	-0,408
Ductilidade a 25° C, mín.	NBR 6293:2015	mm	88,5	100	100	85	80

EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163 °C, 85 MIN	MÉTODO	UN.	RESULTADOS DO ESTUDO				
			CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 70-85	BLEND 50/50	CAP IMPORTADO
Variação de Massa	DNIT 095/2006	%	0,6012	0,518	-2,117	0,8815	0,5145
Variação do Ponto de Amolecimento, °C, máx.	NBR 6560:2016	°C	2,5	4	7	3	4,5

FONTE: Autores (2023)

O ensaio do índice de susceptibilidade térmica correlaciona as mudanças de temperatura com a consistência do ligante, sendo possível relacionar seu comportamento: duro e quebradiço em ligantes pouco susceptíveis ou fluídos e macios em ligante muito susceptíveis. A diferença no CAP 50-70 foi maior que o limite da norma, mostrando que sua variação impacta em um comportamento mais fluído quando há essa variação de temperatura.

Com relação a variação de massa, o CAP 30-45 demonstrou um valor fora da norma. O ganho ou perda de massa é característico por processos de oxidação dos componentes voláteis do ligante. A origem do petróleo cru refinado para a obtenção do CAP 30-45 impacta na quantidade de componentes fluídos (maltenos) presentes na malha, impactando na diferença de comportamento após processo de envelhecimento em forno de filme fino rotativo (RTFOT).

4.2.2 Modificados

Com relação ao CAP modificado, a Tabela 09 indica os valores obtidos para esses tipos de ligantes asfálticos segundo a norma DNIT EM 129/2011, estando em destaque na coloração amarela aqueles que se encontram fora da faixa de especificação.

Tabela 9.0 – Resultados encontrados para os ligantes asfálticos modificados.

ENSAIOS DO LIGANTE ASFÁLTICO – CAP MODIFICADO						
ENSAIOS PARA O LIGANTE	MÉTODO	UN.	RESULTADOS DO ESTUDO			
			55/75 E	60/85 E	65/90 E	CAP 50-70 AD
enetração a 25 °C (100g e 5s)	NBR 6576:2007	mm	46,33	60,48	62,67	38
Ponto de amolecimento, mín.	NBR 6560:2016	°C	52,5	78	83	59
Viscosidade Brookfield a 135° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	982,5	1980	6540	1030
Viscosidade Brookfield a 150° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	559	1150	1967	471
Viscosidade Brookfield a 177° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	226,5	440	510	152,9
Recuperação Elástica a 25°C, 20 cm	NBR 15086:2022	%	75	86	92,5	-

EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163 °C, 85 MIN	MÉTODO	UN.	RESULTADOS DO ESTUDO			
			55/75 E	60/85 E	65/90 E	CAP 50-70 AD
Variação de Massa	ASTM D 2872	%	-0,017	0,054	0,005	-0,142
Variação do Ponto de Amolecimento, °C, máx.	DNIT 095/2006	°C	4	3	5	2

FONTE: Autores (2023)

O CAP modificado 55/75E apresentou resultado fora do normativo no ensaio de Ponto de Amolecimento, refletindo em um ligante que se comporta como um fluido necessitando de menor grau de temperatura.

Com relação ao CAP modificado 65/90E, a viscosidade a 135 °C fora da especificação. A viscosidade para essa metodologia é obtida por meio da taxa de cisalhamento sofrida pelo ligante quando utilizado um material de rotação específica (*spindle*). O valor encontrado demonstra que o ligante apresenta maior rigidez, sendo um fator que implica em certa dificuldade para um bom envelopamento dos agregados (adesividade).

4.2.3 Asfalto Morno

Os valores que constam na Tabela 10 são relacionados aos ligantes utilizados do tipo asfalto morno. Os valores de comparação são baseados segundo o CAP de Origem, o CAP 50-70, e os limites seguem as diretrizes da norma DNIT EM 095/2006.

Tabela 10.0 – Resultados encontrados para os asfaltos mornos.

ENSAIOS DO LIGANTE ASFÁLTICO – ASFALTO MORNO				
ENSAIOS PARA O LIGANTE	MÉTODO	UN.	RESULTADOS DO ESTUDO	
			ASWM Distribuidora	ASWM Cliente
Penetração a 25 °C (100g e 5s)	NBR 6576:2007	mm	84	NA
Ponto de amolecimento, mín.	NBR 6560:2016	°C	48	NA
Viscosidade Brookfield a 135° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	347,5	52
Viscosidade Brookfield a 150° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	178	34
Viscosidade Brookfield a 177° C, sp 21, 20 RPM	NBR 15184:2021	cP	67	17
Ductilidade a 25° C, mín.	NBR 6293:2015	mm	100	NA

EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFOT) A 163 °C, 85 MIN	MÉTODO	UN.	RESULTADOS DO ESTUDO	
			ASWM Distribuidora	ASWM Cliente
Variação de Massa	DNIT 095/2006	%	-0,103	NA

Fonte: Autores (2023)

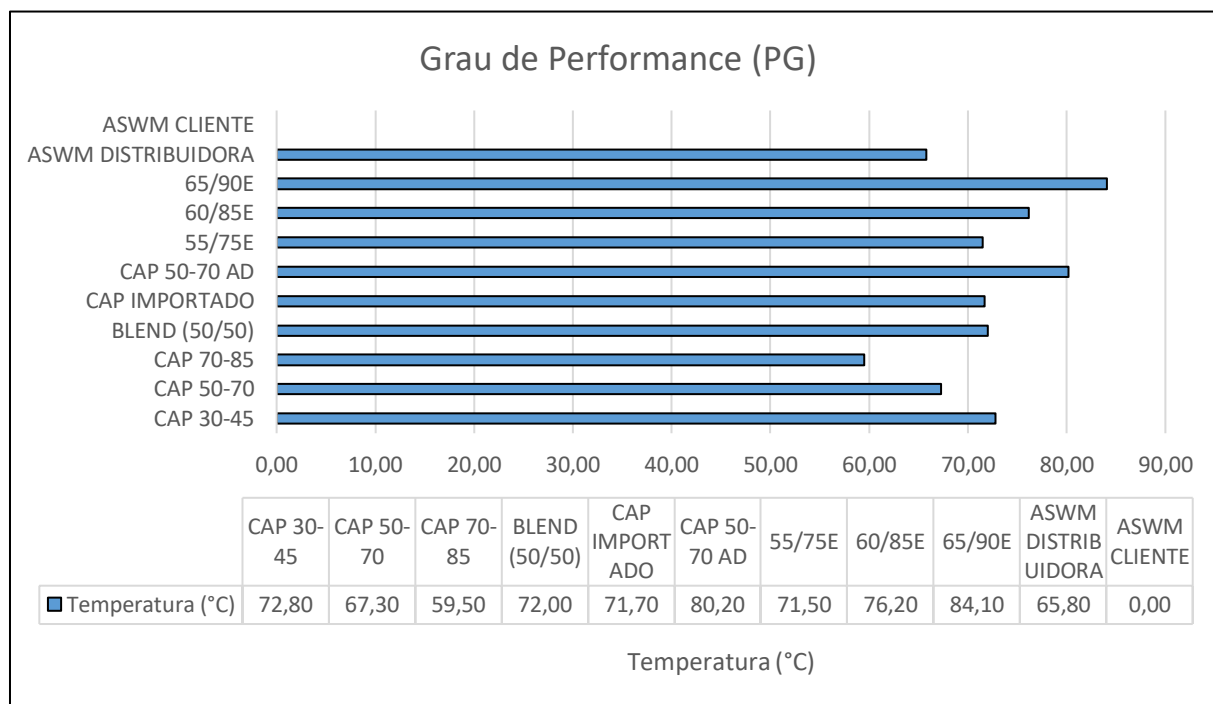
Todos os resultados do ASWM se encontram fora da norma. Para a utilização de um aditivo que proporciona a alteração da temperatura de usinagem e compactação da massa asfáltica é necessário verificar a dosagem realizada pelo cliente, quando esse está em vigência. Seguindo as orientações do mesmo, o ligante obtido da mistura entre CAP 50-70 e aditivo morno foi um ligante de alta fluidez a temperatura ambiente, comportamento atípico para ligantes asfálticos (termo sensível e viscoelástico), sendo esse um impedimento para a realização dos ensaios listados na tabela.

4.2.4. Reologia

4.2.4.1 Grau de Performance (PG)

Os valores que constam no Gráfico 1.0 são referentes grau de performance de cada ligante asfáltico.

Gráfico 1.0 – Resultados do PG nos ligantes.



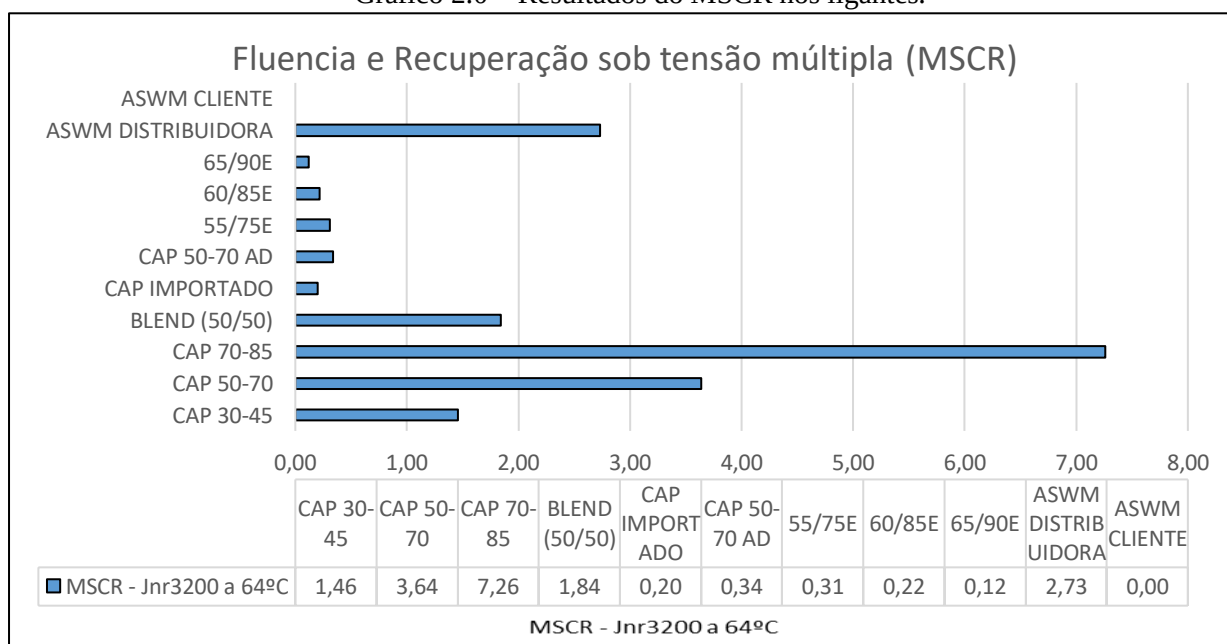
Fonte: Autores (2023)

Os ensaios voltados para a reologia necessitam que o corpo de prova a ser utilizado esteja semissólido a temperatura ambiente. Devido as características do asfalto Morno (ASWM Cliente), não foi possível realizar ensaios com o ligante voltados para a reologia, estando esse desclassificado. Não houve definição de limites para o PG, pois o resultado mostra a temperatura mais elevada que o pavimento pode suportar, avaliando a resistência ao acúmulo de deformação permanente

4.2.4.1 Fluência e Recuperação Sob Tensão Múltipla (MSCR)

Com relação aos resultados do MSCR, o Gráfico 2.0 evidencia os valores obtidos para esse ensaio.

Gráfico 2.0 – Resultados do MSCR nos ligantes.



Fonte: Autores (2023)

O ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) tem o objetivo de verificar o comportamento do ligante asfáltico em seu regime elástico sob tensões repetitivas, o que simula condições de tráfego padronizadas. Para avaliação dos dados, a norma DNIT 423/2020 estabelece quais os tipos de tráfegos que são suportados no pavimento, sendo observado pela regra na Tabela 11.

Tabela 11.0 – Definição do Tipo de tráfego para ensaio MSCR.

Jnr	Tipo de Tráfego
$2,0 < Jnr < 4,5$	Padrão
$1,0 < Jnr < 2,0$	Pesado
$0,5 < Jnr < 1,0$	Muito Pesado
$0,0 < Jnr < 0,5$	Extremamente Pesado

Fonte – DNIT 423/2020

Baseando-se na metodologia utilizada e também na classificação mostrada anteriormente, é possível realizar a verificação do tipo de tráfego suportado pelo pavimento, sendo evidenciado cada tipo conforme a Tabela 12.

Tabela 12.0 – Resultados para Tipo de Tráfego para ensaio de MSCR

Ligante	Tipo de Tráfego	Ligante	Tipo de Tráfego
CAP 30-45	Pesado	55/75E	Extremamente Pesado
CAP 50-70	Padrão	60/85E	Extremamente Pesado
CAP 70-85	NA	65/90E	Extremamente Pesado
BLEND (50/50)	Pesado	ASWM DISTRIBUIDORA	Padrão
CAP IMPORTADO	Extremamente Pesado	ASWM CLIENTE	NA
CAP 50-70 AD	Extremamente Pesado		

Fonte – DNIT 423/2020

Os CAP convencionais apresentam no padrão no quesito tráfego de veículos. Ao sofrerem algum tipo de modificação controlado, a mesma pode elevar suas capacidades de suportar as pressões exercidas pelos pneus dos veículos, tornando-os mais resistentes a tráfegos mais intensos, conforme é mostrado na tabela.

Em comparação entre o CAP convencional 30-45 e o 50-70, os resultados encontrados são esperados, no qual o CAP 30-45 apresenta uma melhor utilização em tráfegos pesados. Esse fator se deve pela maciez do asfalto: como o CAP 30-45 é mais rígido, permite suportar tráfegos mais intensos quando comparado ao CAP 50-70.

O asfalto morno (ASWM cliente) devido a suas características citadas, não foi possível realizar qualquer tipo de ensaio reológico.

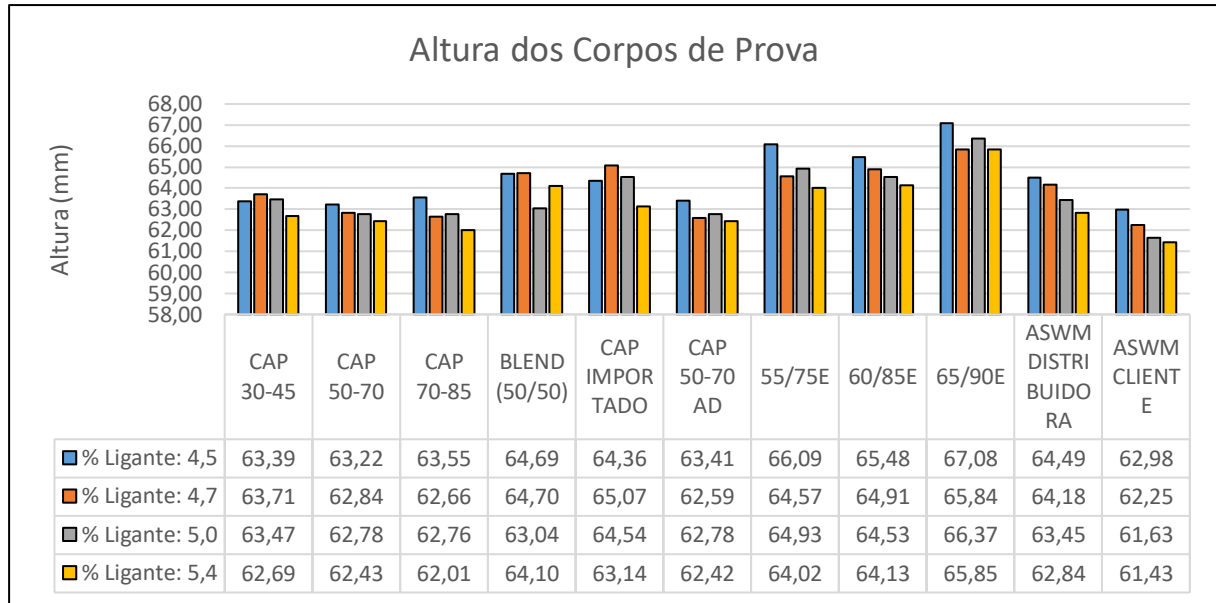
4.3 Massa Asfáltica

4.3.1 Corpo de Prova Compactado

4.3.1.1 Altura e Largura

A medição dos Corpos de prova (CP) é o primeiro passo após a confecção, para verificar se há homogeneidade entre os mesmos. O Gráfico 03 evidencia os valores de altura, enquanto o Gráfico 04 a largura dos CP.

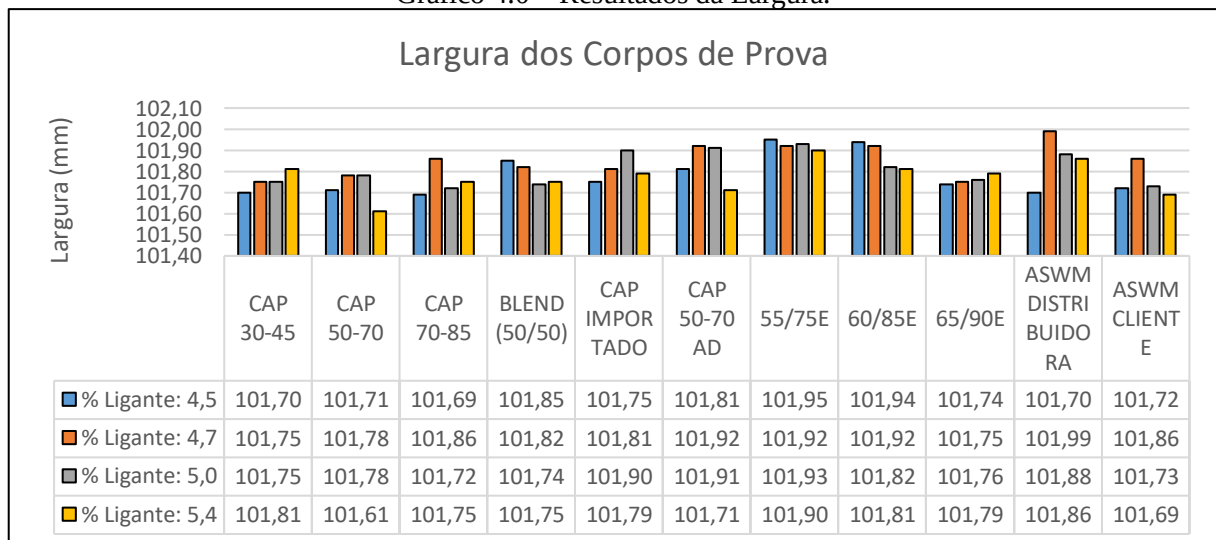
Gráfico 3.0 – Resultados da Altura.



Fonte: Autores (2023)

Conforme o gráfico mostra, a altura varia para cada tipo de ligante. Esse fato acontece pelo tipo de envelopamento do agregado que será realizado, alguns ligantes apresentam maior facilidade para realizar esse processo que outros. Um destaque no gráfico é para o ligante ASWM CLIENTE, o qual apresentou as menos alturas registradas. Esse ligante apresenta em sua composição um aditivo de origem oleosa, que diminuiu o poder de envelopamento do CAP, impactando significativamente na altura do CP. A norma DNER 043/95 permite realizar a correção dos valores de altura encontrados, evitando que a diferença seja impactante nos resultados encontrados.

Gráfico 4.0 – Resultados da Largura.



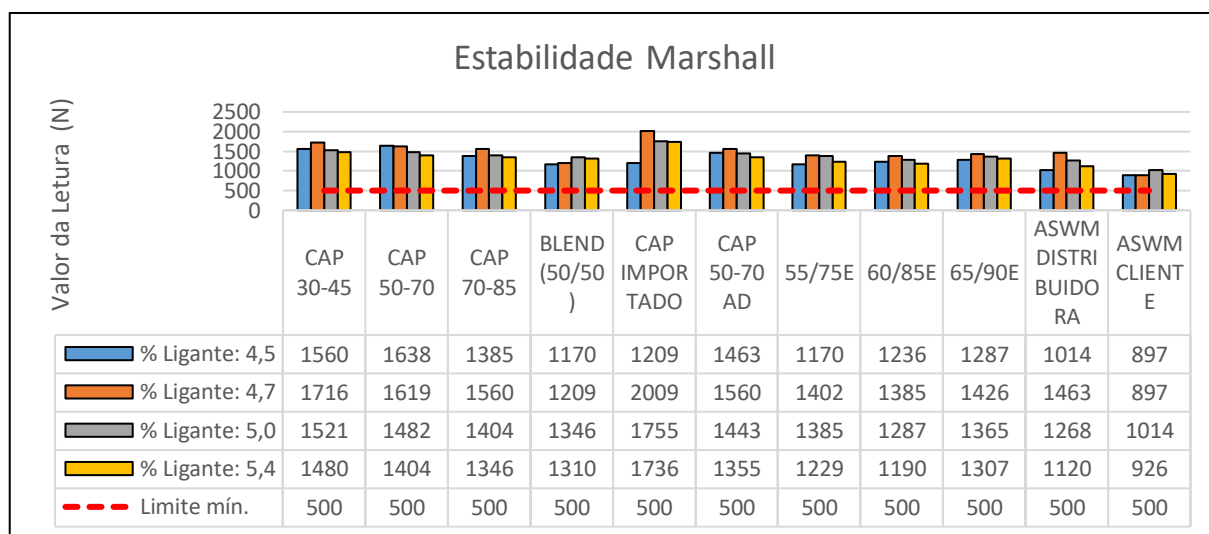
Fonte: Autores (2023)

Os resultados de largura se encontram próximos devido ao tipo de molde utilizado para confecção dos CP, o mesmo apresenta um diâmetro fixo, o que reflexe em resultados semelhantes.

4.3.1.2 Estabilidade Marshall

Para a verificação da resistência máxima a compressão radial é realizada o ensaio de estabilidade. O Gráfico 05 evidencia os valores obtidos para os corpos de prova ensaiados.

Gráfico 5.0 – Resultados da Estabilidade.



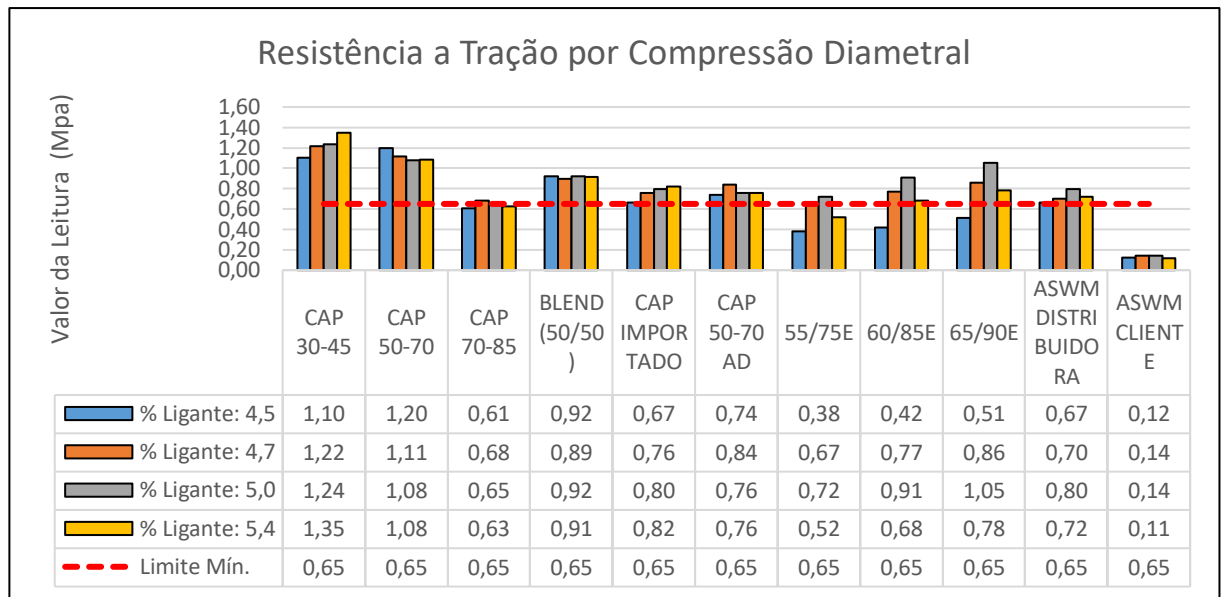
Fonte: Autores (2023)

Os resultados relevantes para esse ensaio estão voltados aos maiores valores encontrados, presente no CAP importado, e aos menores resultados do asfalto morno (ASWM cliente), o que tem justificava pela composição presente no ligante. Enquanto o CAP importado apresenta em sua cadeia asfáltica maior quantidade de asfaltenos, conferindo ao mesmo maior resistência as pressões radiais, o ASWM cliente mesmo sendo de origem de um CAP convencional, a quantidade de aditivo utilizado fez com que o mesmo se torna-se mais maleável, fazendo com que a massa asfáltica resultante apresente valores bem inferiores aos demais.

4.3.1.3 Resistência a tração por compressão diametral estática

O ensaio da tração diametral permite estimar a carga indireta por compressão pela qual ocorre a fissuração do corpo de prova compactado. O Gráfico 6.0 mostra os resultados encontrados durante ensaio.

Gráfico 6.0 – Resultados da Tração.



Fonte: Autores (2023)

O CAP 70-85 e o asfalto morno (ASWM Cliente) apresentaram os menores resultados quando comparado todas as % de ligantes, fator ligado a composição. Ao contrário do CAP importado, o CAP 70-85 apresenta em sua maior composição maltenos, componentes que atuam na maleabilidade dos ligantes asfálticos, e por esse motivo apresenta resultados inferiores quando comparados aos demais. O asfalto morno (ASWM cliente) devido ao excesso de aditivos não apresentou resistência a tração, comportamento esperado uma vez que o ligante a temperatura ambiente não se tornou um semissólido, mas um fluido, sendo o único ligante reprovado para esse ensaio.

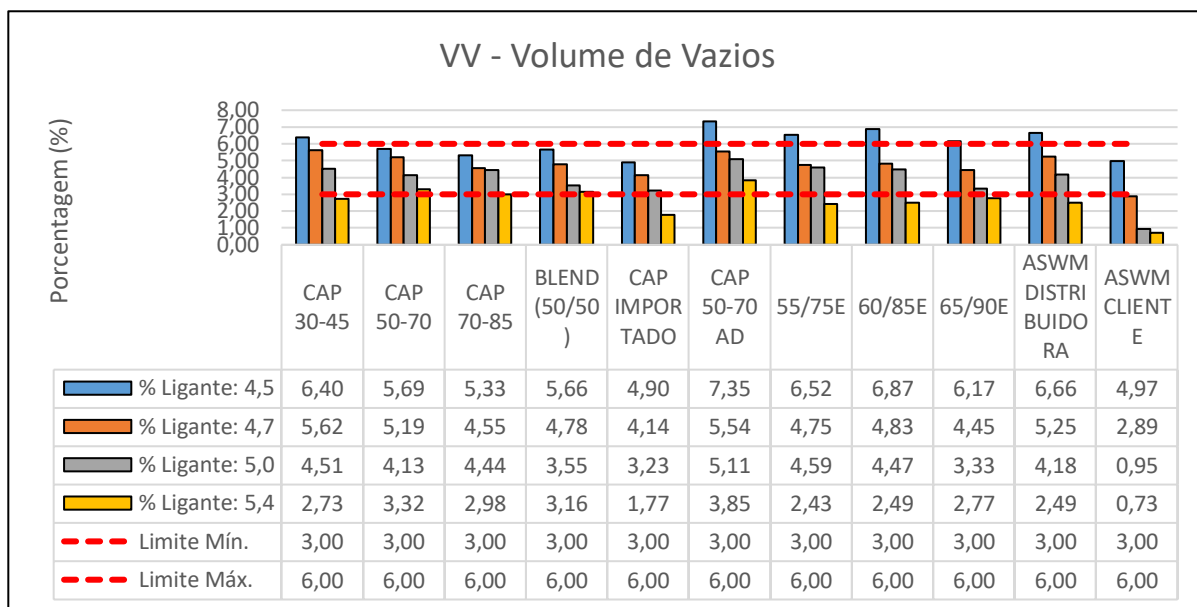
4.3.1.4 Ensaios Volumétricos

Para a realização da dosagem correta no método Marshall é necessário a realização de análises de comparação entre as densidades encontradas com a massa asfáltica compactada e não compactada, os quais estando relacionados a sua altura e quantidade de ligante asfáltico, em porcentagem, utilizado para a mistura asfáltica geram valores voltados para a volumetria.

A volumetria na metodologia Marshall está ligada a vários tipos de comportamento estudados, sendo verificado os resultados para cada tipo em um gráfico específico.

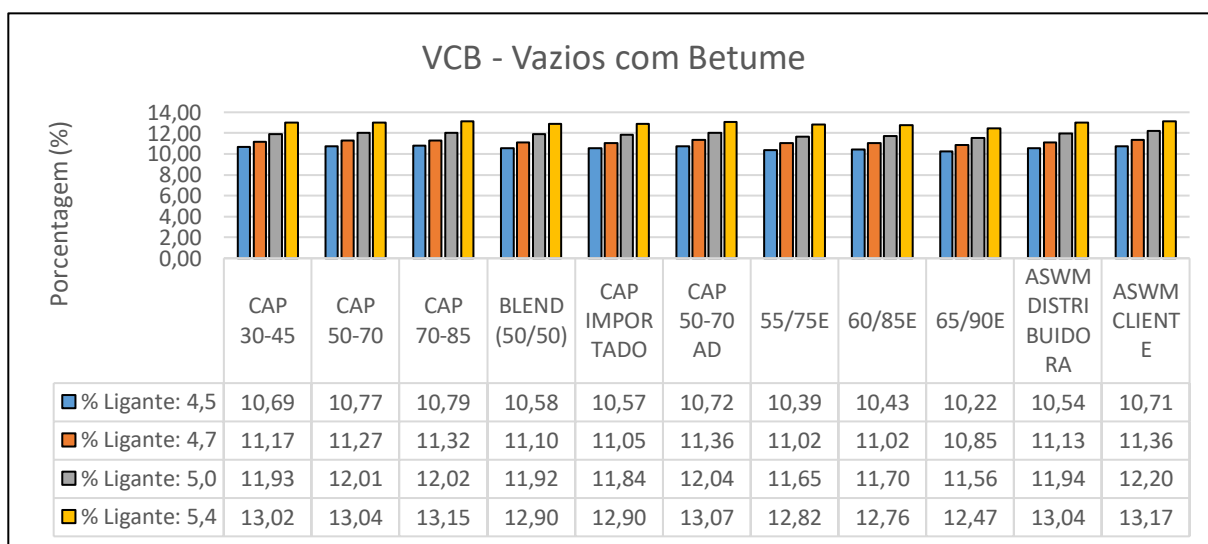
- Volume de Vazios Totais (VV): Porcentagem de espaços vazios totais da massa asfáltica, verificado no Gráfico 07;
- Vazios com Betume (VCB): Porcentagem de espaços vazios que estão presente com ligante (betume), verificado no Gráfico 08;
- Volume de Vazios Minerais (VAM): Porcentagem de espaços vazios somente entre agregado, verificado no Gráfico 09;
- Relação Betume Vazio (RBV): Relação entre o RBV e o VV, verificado no Gráfico 10.

Gráfico 7.0 – Resultados dos Volumes de Vazios (VV).



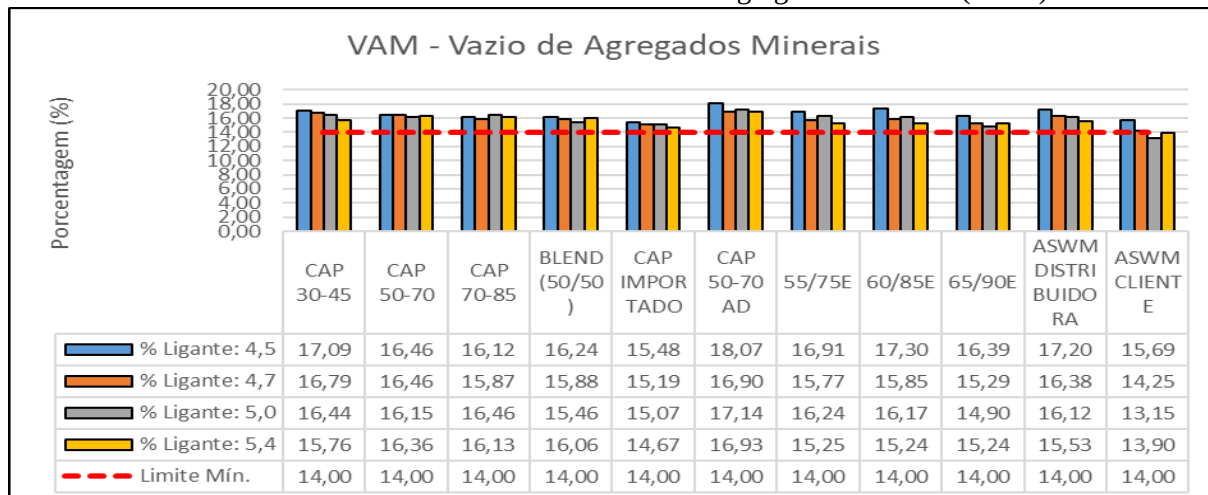
Fonte: Autores (2023)

Gráfico 8.0 – Resultados dos Vazios com Betume (VCB).



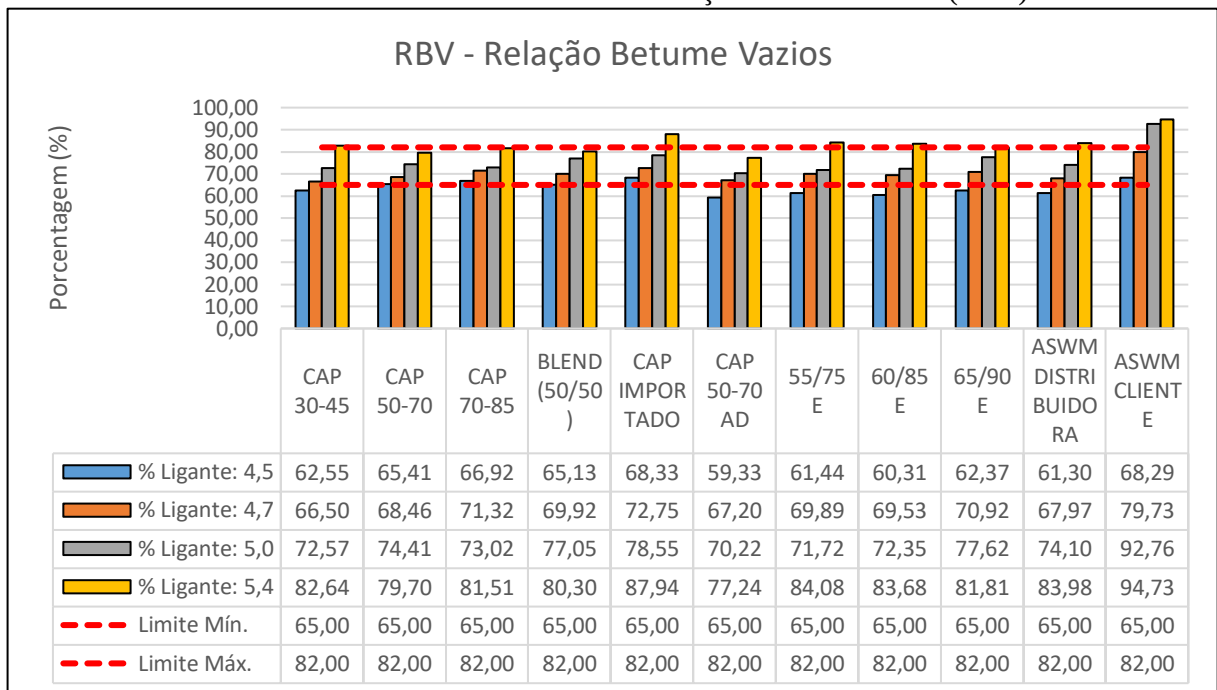
Fonte: Autores (2023)

Gráfico 9.0 – Resultados dos Vazios de Agregados Minerais (VAM).



Fonte: Autores (2023)

Gráfico 10.0 – Resultados das Relações Betume Vazios (RBV).



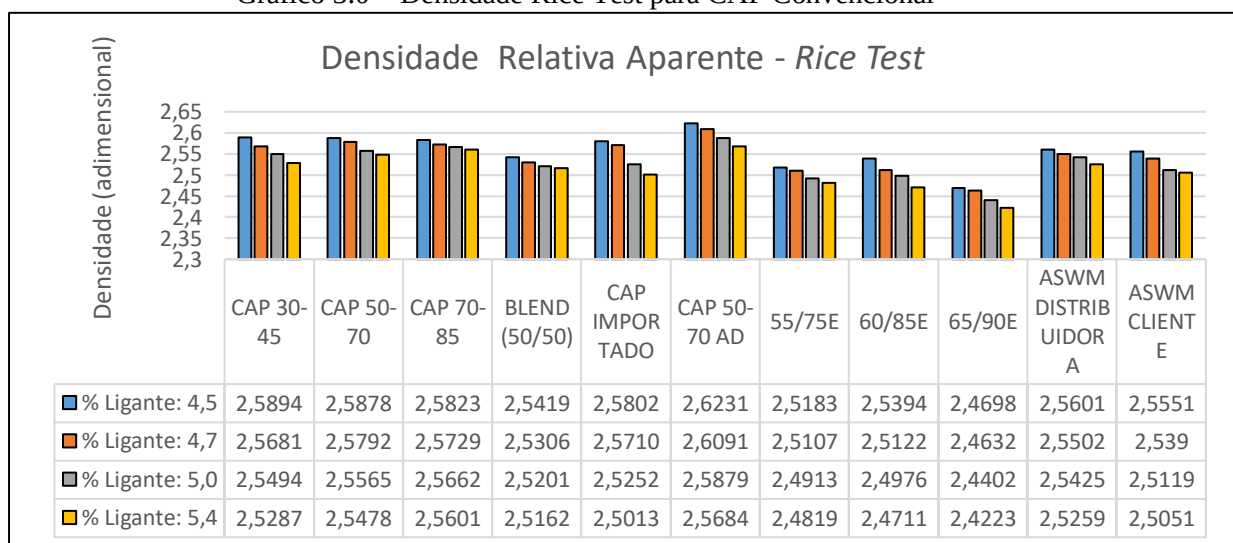
Fonte: Autores (2023)

Conforme demonstrado pelos gráficos o asfalto morno do tipo ASWM Cliente foi o único a ser reprovado nos ensaios devido a sua composição: o aditivo está atuando como um diluente do CAP de origem (CAP 50-70), fazendo com que o mesmo não apresente características satisfatórias para ser utilizado em Estudos Marshall.

4.3.2 Corpo de Prova Não Compactado

O ensaio realizado com os corpos de prova não compactados é a Densidade Relativa Aparente, reconhecida no ramo do asfalto como *Rice Test*. O gráfico 03 mostra os valores encontrados durante as análises dos ligantes em quatro concentrações pré-definidas no teste.

Gráfico 3.0 – Densidade Rice Test para CAP Convencional



Fonte: Autores (2023)

Para os dados apresentados não há limites de valores. É notado que os resultados apresentam de forma decrescente, comportamento esperado quando ocorre a adição de ligante, o mesmo interfere na quantidade de agregado pesado, diminuindo o resultado da densidade.

5 CONCLUSÃO

A maior motivação para a realização desse estudo foi baseada nos dados que um dos integrantes do grupo trabalha ao longo dos meses, no qual elucidava valores diferentes para uma mesma massa asfáltica quando alterava o ligante.

A distribuidora de ligantes asfálticos tem o cuidado de testar os agregados com diversos ligantes para garantir o fornecimento daquele que se apresenta como o “melhor” no cenário que irá ocorrer sua aplicação.

Partindo dessa premissa, houve a geração da dúvida se realmente os valores obtidos condiziam com o conhecimento teórico obtido ao longo dos anos, se realmente o trabalho realizado pela distribuidora de asfaltos agregava valores aos clientes, e se os dados não seriam alterados somente devido a diferentes dosagens do material.

Com base nos resultados encontrados foi possível inferir que há diferença para os resultados da massa asfáltica quando confeccionada com diferentes tipos de ligantes asfálticos, tendo a possibilidade de alguns resultados não estarem dentro do normativo. Ao fim do estudo é possível afirmar que existem diferenças entre massas asfálticas para cada tipo de ligante utilizado.

Mesmo havendo evidências das diferenças entre massas asfálticas, vale a regra da verificação do cenário de aplicação para definir qual será o melhor ligante a ser utilizado com determinado agregado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASKELAND, D. R. **Ciencia e ingeniería de los materiales**. Tercera edición, Thomson editores. Universidade de Missoure-Rolla. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15086**: Materiais betuminosos — Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro de cimentos asfálticos modificados por polímeros elastoméricos ou borracha. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15235**: Materiais asfálticos — Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: informação e documentação - artigo em publicação periódica técnica e/ou científica - apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6293**: Ligantes asfálticos — Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**: Ligantes asfálticos — Determinação do ponto de amolecimento — Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2016.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576: Materiais asfálticos — Determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Estudo granulométrico dos agregados.** Rio de Janeiro, [s.n], 2003
- BERNUCCI, L. L. B., et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.** 2ªed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A., 2022.
- COELHO JR., M. L. P.; ROCHA, P. H. T. **Estudo preliminar de misturas asfálticas à quente utilizadas em obras de pavimentação na região metropolitana de Goiânia.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2013.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – 043-95: Misturas Betuminosas a quente – ensaio Marshall.** Rio de Janeiro, 1995.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 031-2006: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 129-2011: Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material.** Rio de Janeiro, 2011.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 130-2010: Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 131-2010: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 136-2018: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 155-2010: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 178-2018: Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 423-2020: Pavimentação – Ligante asfáltico – Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2020.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 427-2020: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 428-2020: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – 439-2022: Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2020.

EN 12697 – 24. **Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 24: Restistance to fadigue.** Comissão Europeia de Normalização (CEN). Bruxelas, 2004.
European Committee for Standardization, ECS. En 12597: **Bitumen and bituminous binders terminology.** Bruxelas, European Committee for standardization, 2000.

European Committee for Standardization, ECS. En 12597: **Bitumen and bituminous binders terminology.** Bruxelas, European Committee for standardization, 2000.

FERNANDES, M. R. S. **Efeito de Aditivo Tipo Óleo e Enxofre na Reologia de Asfaltos Modificados com SBS.** 2009. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de dimensionamento mecânico empírico de pavimentos asfálticos** – SisPav. Universidade Federal do Rio Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

HIRSH, F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas preparadas com diferentes tipos de ligantes.** 2007. 130 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

IWANAGA, F.I. **Avaliação da Influência do Tipo de Agregado, do Tipo de ligante, do Tipo de Moldagem e do tipo de Fíler na Desempenho à fadiga de misturas asfálticas densas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2007.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação.** 2016. 33 p.. Dissertação (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, 2016.

LESUEUR, D. La Rhéologie des Bitumes: Principes et Modification. **Rhéologie**, vol.2, 1-30, 2002.

LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. **Advances in Colloid and Interface Science**, vol.145, p. 42-82, 2009.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica**. 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MOTTA, L. M. G. et al. **Princípios do projeto e análise Superpave de misturas asfálticas**. Tradução comentada. n. FHWA-SA-95-003. Rio de Janeiro. 1996.

ROBERTS, F. L.; P. S. KANDHAL; E. R. BROWN; D. Y. Lee e T. W. KENNEDY. **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction**. Ed. NAPA Education Foundation. Lanham, Maryland, 1996

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: PINI, v. 2, 2001

SOARES, J.B. FREITAS F.A.C. CASTELO BRANCO J.V.; MOTTA L.M.G. (2000) **Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ**. 32a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Brasília.

SOARES, J.P. et al. **Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Variação de granulometria e de CAP**. In: 15º Encontro de Asfalto, IBP, 2000.

VILELA, Ricardo. **Estudos Laboratoriais para Determinação do Comportamento Mecânico de uma Mistura Dosada pelo Método Marshall**. Goiânia. 2018

VIVONI, A.M. **SAINDO DO EMPIRISMO: ESPECIFICAÇÃO PG SUPERPAVE DE LIGANTES ASFÁLTICOS**. In. 43º Reunião Anual de Pavimentação, Maceió, AL, 2014.

WEIDMANN, D. F.. **Contribuição ao estudo da influência da forma e na composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades de concretos de cimento Portland**. Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis-SC, 2008.

WOODS, K. B. **Highway engineering handbook**. Nova Iorque, McGraw Hill, 1960.