



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE

**UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS) NA
DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE
ATRITO (CPA)**

EDILZA RAKEL NÓBREGA

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado a
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Campina Grande, como
requisito obrigatório para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

CAMPINA GRANDE – PB

OUTUBRO DE 2021

**UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS) NA
DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE
ATRITO (CPA)**

EDILZA RAKEL NÓBREGA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, APRESENTADO A UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO REQUISITO OBRIGATÓRIO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Orientador

Ma. Talita Miranda de Sousa

Coorientadora

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

OUTUBRO DE 2021

DEDICATÓRIA

A minha maior fonte de força e inspiração, o responsável por tudo que me tornei e meu maior incentivador, Manoel Mário da Nóbrega (in memoriam), meu pai.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela saúde e pela sabedoria que me concedeste, por me guiar nos momentos turbulentos e não me permitir desistir.

Ao meu pai, Manoel (*in memoriam*), por todo amor que me deste, por todas as lições que me ensinaste, que do céu me guia por toda a minha caminhada. Tudo que sou devo a ti.

Aos meus irmãos, Mauricio Neto e Manoel Júnior, por sonharem junto a mim com essa vitória.

Ao meu avô paterno, Maurício, por todo carinho, doçura, cuidado e incentivo.

Aos meus sobrinhos, Ágata e Álvaro, por serem minha paz.

Ao meu namorado, João Pedro, por todos os momentos de felicidade, afeto, companheirismo e paciência.

Ao meu orientador, Professor Adriano, pelos ensinamentos e atenção ao longo do curso e na construção deste trabalho.

A minha Coorientadora, Talita, por ser um presente na minha vida, por toda amizade, companheirismo, ensinamentos e por toda ajuda e esforço para que este trabalho fosse possível. Minha gratidão.

Aos técnicos e colegas do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Daniel, Joseildo, Jadilson, e Ladjane, pela ajuda na execução das várias etapas deste trabalho.

A UFCG, instituição que me promoveu a formação de Engenheira Civil, e todo corpo docente da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, em especial as professoras Carina Silvani e Marília Marcy, por todo conhecimento transmitido, todo carinho e atenção durante a graduação e as orientações de PIVIC e Estágio.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse sonho fosse possível.

Minha eterna gratidão!

RESUMO

No Brasil, país predominantemente rodoviário, tem-se motivado a busca por métodos de pavimentação que ofereçam conforto e segurança aos usuários, garantindo entre outras características, uma boa resistência a derrapagens e a drenagem eficaz das águas superficiais. Para suprir essa necessidade surgiram os pavimentos drenantes, que são empregados a fim de mitigar a necessidade de que um pavimento seja capaz de permitir o escoamento de águas, como é o caso da Camada Porosa de Atrito (CPA). A CPA é uma tecnologia utilizada como revestimento de pavimentos, e tem por característica o elevado índice de vazios, entre 18 e 25%. O objetivo dessa pesquisa foi contribuir nas investigações sobre a viabilidade do uso do compactador giratório Superpave (CGS), na dosagem da CPA, com base nos parâmetros estabelecidos pela norma DNIT-ME 386/99. Desta forma, objetivou-se acrescentar a vantagem da compactação por amassamento, que simula mais fielmente a compactação de campo, à realidade da dosagem brasileira para camadas porosas de atrito, que atualmente é feita por meio da metodologia Marshall. Para o desenvolvimento da pesquisa foram realizadas compactações no CGS de misturas asfálticas nos teores de ligante de 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5% em peso de agregado, as quais foram ensaiadas para determinação dos parâmetros de volume de vazios, desgaste por abrasão - Cântabro e resistência à tração por compressão diametral como determinado pela DNIT-ME 386/99, para fins de dosagem. Em posse destes parâmetros, o teor ótimo definido foi de 4,5% de ligante para a CPA. Com propósito de avaliar os efeitos da compactação CGS na mistura CPA dosada pelos parâmetros da DNIT-ME 386/99, foi realizado os ensaios de caracterização mecânica e hidráulica estabelecidos pela ASTM D7064-13, que são volume de vazios, cântabro, resistência a tração por compressão diametral, escorrimento, módulo de resiliência, lottman e vazios comunicantes. Os resultados encontrados foram satisfatórios, apontando a viabilidade do uso da compactação CGS em misturas asfálticas tipo CPA dosadas de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma brasileira DNIT-ME 386/99.

Palavras-chave: Camada porosa de atrito; Compactador giratório SUPERPAVE; Pavimento; DNIT-ME 386/99; ASTM D7064-13.

ABSTRACT

In Brazil, a country that uses predominantly road transport, has been doing research for paving methods that are able to offer confort and safety to users. It guarantees a good skid resistance and a effective drainage of superficial waters, among other characteristics. Therefore draining pavements were created. They are used to mitigate the need for the pavement to allow the flow of waters, much like the Open-graded friction course (OGFC). The OGFC is a tecnologia used as floor coating and its main characteristic is high volume of air voids, between 18% and 25%. The goal of this research is to contribute in investigations about the viability of use Compaction SGC, in dosage of OGFC, based on parameters established by norm DNIT-ME 386/99. Thus the study aimed to increase the benefit of kneading compaction that simulate more accurately the compaction field, to reality of Brazilian dosage of OGFC, which is now made with Marshall technology. In this study, we made Compaction SGC of asphalt mixtures in binder contentes of 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5% in aggregate weight. They were tested to determine the parameters of volume of air voids, Cantabro and Indirect Tensile Strength, as determined by the DNIT-ME 386/99 standard for dosage purposes, Considering the results, the optimal content binder is 4,5% for OGFC. With the purpose of evaluating the effects of Compaction SGC in the CPA mixture dosed by the parameters of DNIT-ME 386/99, the mechanical and hydraulic characterization tests established by ASTM D7064-13 were carried out, which are volume of air voids, Cantabro, Indirect Tensile Strength, flow, Resilient Modulus, moisture-induced damage and communicating voids. The results found were satisfactory, indicating the feasibility of using Compaction SGC in OGFC dosed according to the parameters established by the Brazilian standard DNIT-ME 386/99.

Keywords: Open-graded friction course; Compaction SGC; Pavement; DNIT-ME 386/99; ASTM D7064-13.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Resposta mecânica de pavimento flexível: pressões concentradas	15
Figura 2- Resposta mecânica de pavimento rígido: pressões distribuídas.	16
Figura 3- Camadas genéricas de um pavimento.	17
Figura 4- Classificação dos revestimentos	20
Figura 5- Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente.	21
Figura 6- Funcionalidade da camada porosa de atrito - CPA.....	26
Figura 7- Compactador Giratório SUPERPAVE	32
Figura 8-Esquemática da primeira etapa da pesquisa	33
Figura 9-Esquema da segunda etapa da pesquisa.....	33
Figura 10- Agregados utilizados na pesquisa	35
Figura 11- Conjunto de peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria.....	36
Figura 12- Curvas granulométricas dos agregados.....	37
Figura 13-Fluxograma de dosagem	39
Figura 14- Curva da composição granulométrica do CPA.....	39
Figura 15- Gráfico de viscosidade versus temperatura	40
Figura 16- Procedimento de ensaio para determinação da densidade aparente da mistura.....	42
Figura 17- Aparelhagem para determinação da densidade máxima da mistura (Rice).....	43
Figura 18-Corpos de prova antes e depois do ensaio Cântabro.....	44
Figura 19-Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral.....	45
Figura 20- Prensa para realização do ensaio de resistência a compressão diametral.	45
Figura 21- Prensa hidráulica UTM-25.....	46
Figura 22-Aplicação do vácuo nos corpos de prova.....	47
Figura 23- Corpos de prova após o processo de congelamento.	48
Figura 24-Corpos de prova em banho maria a 60°C.	48
Figura 25- Amostra acomodada no cesto para determinação da porcentagem de escorrimento.	49
Figura 26- Material resultante do escorrimento do cesto.	50
Figura 27- Procedimento de ensaio, vazios comunicantes.	51
Figura 28 - Gráfico volume de vazios <i>versus</i> teor de ligante.	53
Figura 29-Gráfico % de desgaste <i>versus</i> teor de ligante.	54
Figura 30- Gráfico da resistência a tração versus teor de ligante.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da CPA – DNIT-ME 386/99.....	27
Tabela 2- Caracterização do ligante AMP 55/75-E.....	34
Tabela 3- Ensaio e normas regulamentadoras para caracterização dos agregados.....	35
Tabela 4- Quantidade passante acumulada.....	36
Tabela 5- Caracterização física dos agregados graúdos.....	37
Tabela 6- Caracterização física do agregado miúdo.....	38
Tabela 7- Ensaio e normas utilizadas para caracterização mecânica e hidráulica das misturas.	41
Tabela 8- Resultados dos ensaios para determinação do volume de vazios.....	52
Tabela 9- Resultado dos ensaios de caracterização da mistura.	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Termos aplicáveis de revestimento asfáltico.....	19
---	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.2.	Objetivo Geral	13
1.2.2.	Objetivos Específicos	14
2.	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1.	CONCEITO DE PAVIMENTO	14
2.2.	CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS	14
2.3.	Pavimento Flexível	16
2.3.1.	Subleito.....	17
2.3.2.	Reforço do Subleito	17
2.3.3.	Sub-Base.....	18
2.3.4.	Base	18
2.3.5.	Revestimento	18
2.4.	CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)	22
2.4.1.	Caraterísticas	22
2.4.2.	Propriedades da CPA.....	23
2.4.2.1.	Propriedades Resistentes	23
2.4.2.2.	Propriedades Hidráulicas	24
2.5.	NORMATIZAÇÃO.....	26
2.5.1.	<i>DNIT-ME 386/99</i>	26
2.5.2.	<i>ASTM D7064-13</i>	28
2.6.	LIGANTE ASFÁLTICO	28
2.6.1.	<i>AMP 55-75</i>	29
2.7.	AGREGADOS	29
2.8.	COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS)	30
2.8.1.	Histórico	30

2.8.2.	Servopac Gyrotory Compactor- ICP Global@.....	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1.	MATERIAIS	34
3.1.1.	Ligante Asfáltico: AMP 55/75-E.....	34
3.1.2.	Agregados.....	35
3.1.2.1.	Granulometria dos Agregados	35
3.1.2.2.	Caracterização Física dos Agregados Graúdos	37
3.1.2.3.	Caracterização Física do Agregado Miúdo	38
3.2.	METODOLOGIA.....	38
3.2.1.	MÉTODO DE DOSAGEM.....	38
3.2.1.1.	Composição Granulométrica	38
3.2.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E HIDRÁULICA DA MISTURA CPA .	41
3.2.2.1.	Determinação do volume de vazios.....	42
3.2.2.2.	Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro.....	43
3.2.2.3.	Resistência à tração indireta por compressão diametral	44
3.2.2.4.	Módulo de Resiliência	46
3.2.2.5.	Determinação do Dano por Umidade Induzida	47
3.2.2.6.	Escorrimento do ligante.....	49
3.2.2.7.	Determinação dos vazios comunicantes	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1.	Determinação do Teor Ótimo de Ligante	52
4.1.1.	Determinação do volume de vazios.....	52
4.1.2.	Determinação do desgaste por abrasão - Ensaio Cântabro.....	54
4.1.3.	Resistência à tração indireta por compressão diametral	55
4.1.4.	Teor Ótimo de Ligante	56
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA COM TEOR ÓTIMO	56

5.	CONCLUSÕES	59
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

Em qualquer período da história, torna-se indiscutível a importância das vias terrestres para indivíduos, sociedades e economias. Em um contexto contemporâneo podemos citar o importante papel das malhas rodoviárias, desde o desenvolvimento econômico do país até a garantia de direitos fundamentais, como o de ir e vir, dos seus cidadãos. No Brasil, país predominantemente rodoviário, tem-se motivado a busca por métodos de pavimentação que permitam suprir as necessidades desse modal unindo qualidade, conforto e segurança aos usuários e à população aos seus arredores.

Por apresentar em quase sua totalidade pavimentação flexível, o principal tipo de revestimento encontrado na malha rodoviária brasileira é a mistura asfáltica, material esse, foco de várias pesquisas que buscam tecnologias capazes de aumentar sua durabilidade e qualidade, com intuito de suprir as solicitações geradas pelas crescentes demandas de tráfego. Mesmo sendo uma área com volumoso número de pesquisas, ainda existe uma deficiência no desenvolvimento de técnicas de construção e restauração do revestimento e das demais camadas do pavimento que contribuíssem para a melhoria do desempenho frente aos esforços gerados pelo constante uso.

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), no Manual de Projeto e Práticas Operacionais para Segurança nas Rodovias, elaborado em 2010, uma rodovia segura deve além de oferecer conforto aos usuários, ter um pavimento capaz de suportar os efeitos do mau tempo, permitir deslocamento suave, não causar desgaste excessivo dos pneus nem ruídos altos, ter estrutura forte, resistir ao desgaste, ter boa resistência a derrapagens e permitir o escoamento das águas.

Diante deste contexto, os pavimentos drenantes são empregados a partir da necessidade de que um pavimento seja capaz de permitir o escoamento de águas como é o caso da Camada Porosa de Atrito (CPA).

Segundo a norma DNIT-ME 386/99, a CPA é um tipo de material utilizado como revestimento em rodovias, que tem por característica um processo de seleção de agregados que fazem com que a massa asfáltica apresente uma composição granulométrica aberta, com elevado índice de vazios (18 a 25%) após a compactação. Os parâmetros analisados pela norma para fins de dosagem da mistura são volume de vazios, desgaste por abrasão- cântabro e resistência a compressão diametral (RT), já a compactação da mistura segundo Bernucci et al (2010) e a especificação brasileira seguem a metodologia *Marshall*.

Para a especificação americana, ASTM D7064-13, que normatiza a dosagem de mistura com granulometrias abertas, a qual o CPA faz parte, o índice mínimo de vazios esperados após a compactação é de 18%. A especificação indica ainda, a utilização do compactador giratório Superpave, sob uma aplicação de 50 giros. Esse método de compactação, por amassamento é o que mais se aproxima da compactação em campo, sendo essa uma das grandes vantagens do seu uso nas pesquisas sobre misturas asfálticas.

Roseno (2005) ressalta que esse elevado índice de vazios aliados à declividade transversal da pista, possibilita a rápida infiltração e drenagem da água da chuva. Com isso, reduz-se a possibilidade de ocorrência do fenômeno de aquaplanagem, espelho noturno e formação de spray. Além das condições de segurança, a implementação da CPA favorece o conforto e saúde dos usuários e população das proximidades das rodovias, ao reduzir os níveis de ruídos resultantes da interação pneu/pavimento. Para Dresch (2016) o aumento da aderência entre pneu e pavimento com o uso dessa tecnologia, acresce outro ponto positivo no item segurança.

Ao longo do tempo e utilização, os pavimentos com revestimento de CPA ainda apresentam problemas como a redução da permeabilidade, e deformações estruturais, como o desprendimento dos agregados da mistura, tornando as manutenções ainda mais necessárias. Para sanar esse problema, o uso de ligantes asfálticos modificados por polímeros é muito bem aceito para esse tipo de mistura, conferindo a estabilidade necessária ao corpo estrutural do agregado como afirma Roseno (2005).

Com embasamento nos estudos já existentes acerca dessa tecnologia, e diante da necessidade de entendê-la e aprimorá-la a fim de tornar seu uso no Brasil viável e satisfatório o objetivo dessa pesquisa é contribuir nas investigações sobre a viabilidade do uso do compactador giratório Superpave na dosagem da CPA com base os parâmetros estabelecidos pela norma DNIT- ME 386/99. Desta forma, objetivou-se acrescentar a vantagem da compactação por amassamento, que simula mais fielmente a compactação em campo, à realidade da dosagem brasileira para camadas porosas de atrito.

1.2.Objetivo Geral

Estudar a viabilidade do uso do compactador giratório SUPERPAVE ® (CGS) na dosagem das camadas porosas de atrito, tomando como base os parâmetros estabelecidos pela norma DNIT-ME 386/99.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a viabilidade do uso do CGS na dosagem de misturas asfálticas do tipo CPA;
- Estudar a influência do uso do compactador CGS, nas propriedades mecânicas e hidráulica de misturas asfálticas do tipo CPA.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. CONCEITO DE PAVIMENTO

Segundo Pinto e Preussler (2010) para os usuários é considerado pavimento a estrutura resistente ao tráfego, capaz de transmitir conforto e segurança. No entanto, do ponto de vista técnico o pavimento deve possuir características que o permitam transmitir as tensões aplicadas em sua superfície até as camadas subjacentes, de forma a não exceder as tensões admissíveis suportadas pelas matérias que as constituem.

Balbo (2007) deixa claro que além dos aspectos citados acima por Pinto e Preussler, - conforto, segurança e resistência – a engenharia de pavimentação, deve sempre buscar um mínimo custo para uma implementação satisfatória, utilizando, quando viável, os materiais locais, de forma a conferir um bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo dos anos de serviço.

Para Bernucci et al (2010), os pavimentos podem ser classificados em rígidos e flexíveis, outros acrescentam a esta, a categoria intermediária dos semirrígidos.

2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Para uma conceituação mais abrangente serão citados abaixo as três classificações encontradas nas bibliografias relevantes de pavimentação. A exemplo da classificação apresentada no Manual de Pavimentação do DNIT de 2006 e por Pinto e Preussler (2010).

Flexível: aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

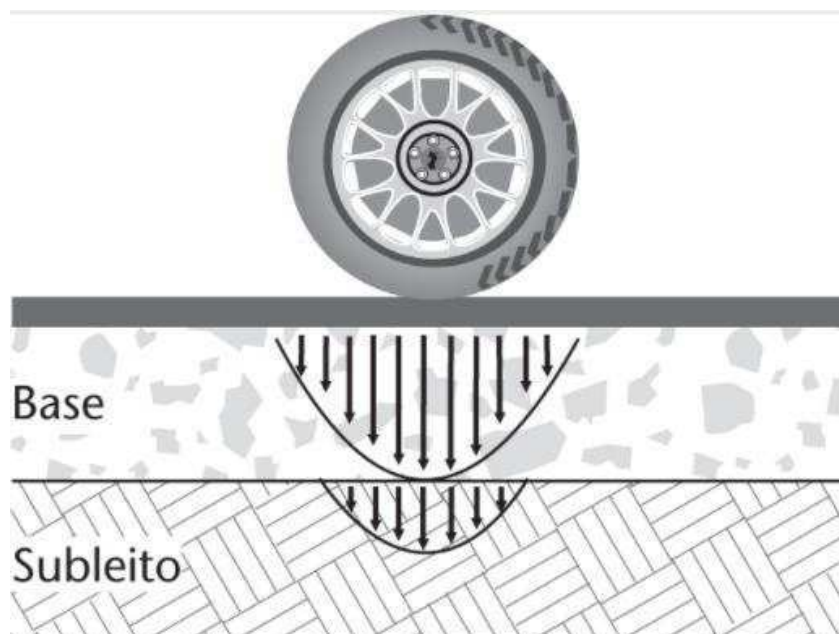
Semirrígido: caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.

Rígido: aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

Mesmo diante de uma aceitação mundial dessas classificações, para Balbo (2007), não existem definições clássicas totalmente coerentes. O autor afirma que, por se tratar de uma configuração em camadas, a estrutura dos pavimentos pode ao mesmo tempo apresentar tanto camadas rígidas, quanto flexíveis. Portanto, para que se entenda então a diferença entre esses tipos de pavimentos, o autor adota a diretriz de diferenciação estabelecida por Yoder e Witczak, em 1975, que tem embasamento a distribuição de esforços sobre si aplicados no solo de fundação.

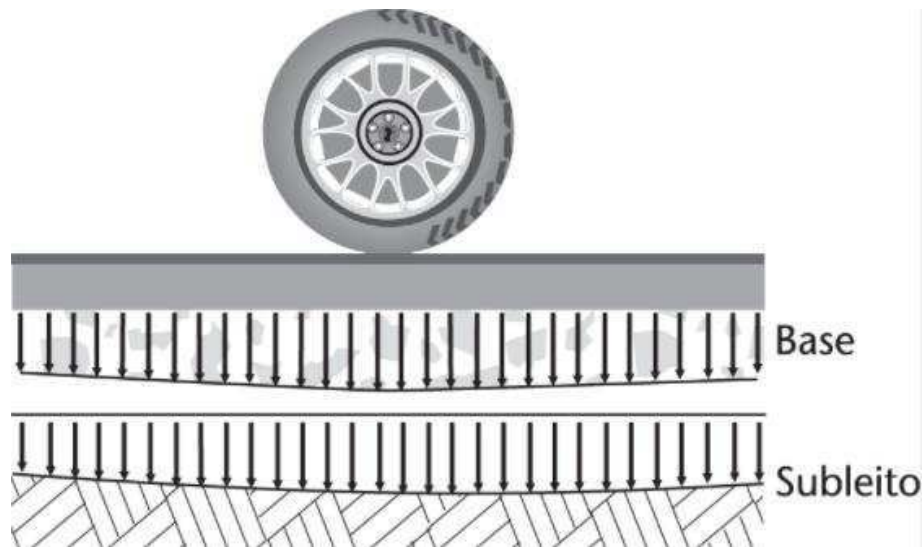
Segundo Balbo (2007), nos pavimentos do tipo flexível a carga atuante gera um campo de tensões concentrado, ou seja, próximo ao ponto de aplicação dessa carga (Figura 1), enquanto nos pavimentos do tipo rígido o comportamento das tensões é disperso, ou seja, a distribuição da carga dar-se de maneira semelhante em toda a extensão da placa (Figura 2). Em resumo, nos pavimentos com comportamento mecânico rígido, as pressões impostas ao subleito são bem inferiores em relação aos pavimentos com comportamento mecânico flexível.

Figura 1- Resposta mecânica de pavimento flexível: pressões concentradas



Fonte: BALBO (2007, p. 50).

Figura 2- Resposta mecânica de pavimento rígido: pressões distribuídas.



Fonte: BALBO (2007, p. 51).

No Brasil, devido ao custo de implementação, praticamente a totalidade das estradas de rodagem têm pavimentação do tipo flexível, como mostra o Relatório Gerencial do Conselho Nacional de Transportes de 2019, sendo por esse motivo o pavimento detalhado neste trabalho.

2.3. Pavimento Flexível

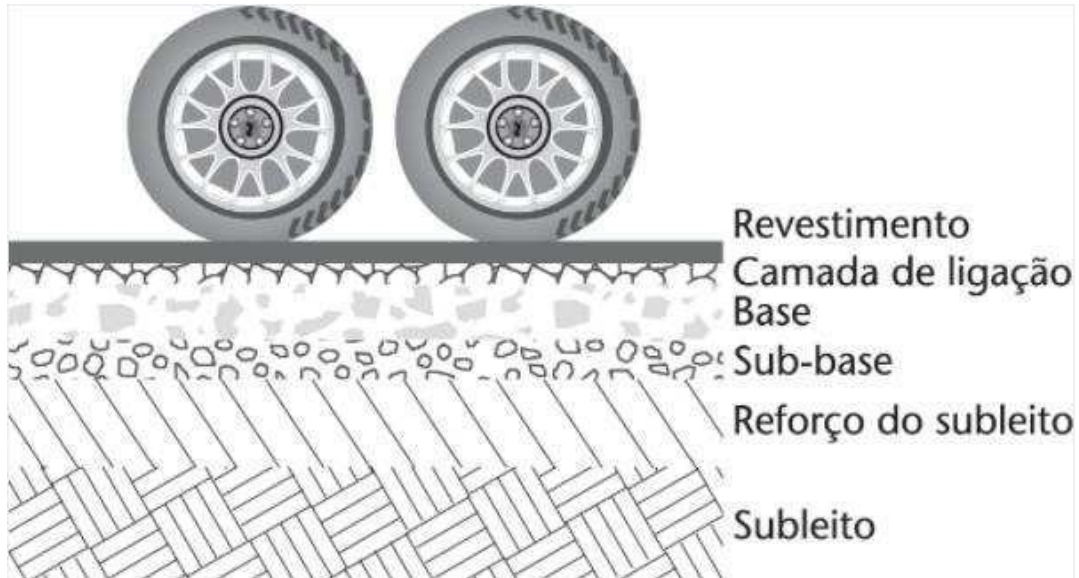
A estrutura de um pavimento é composta de camadas de diferentes materiais compactados um sobre o outro a fim de formar desde o revestimento até o subleito, esses materiais são escolhidos de acordo com a necessidade resistente imposta pelo tráfego. Desta forma pode-se afirmar que o projeto de um pavimento deve ser idealizado, do ponto de vista estrutural, para receber e transmitir esforços às camadas inferiores, aliviando as pressões geradas pelos automóveis e ambiente, garantindo a integridade do pavimento, ao evitar o surgimento de rupturas ou outras formas de deformações incompatíveis com a utilização (BALBO, 2007).

Segundo Balbo (2007) cada camada da composição pode possuir uma ou mais funções específicas, que devem entre tantas utilidades, proporcionar ao veículo, em qualquer condição climática, condições satisfatórias de suporte e rolamento. Assim, todas as respostas às tensões geradas pelas cargas de utilização, serão de responsabilidade de cada uma das camadas ou ainda do conjunto de camadas.

Para Balbo (2007) e Bernucci et al. (2010) uma estrutura é considerado um pavimento, se tiver no mínimo ter uma camada de revestimento e uma de fundação. No entanto, a configuração de camadas mais comum encontrada em um pavimento é: revestimento, base, sub-

base, reforço do subleito e subleito, podendo ainda apresentar camadas adicionais na sua configuração, como camadas de rolamento e camadas intermediárias ou de ligação (Figura 3).

Figura 3- Camadas genéricas de um pavimento.



Fonte: BALBO (2007, p. 40).

Para que se entenda melhor o funcionamento do conjunto “pavimento”, serão conceituadas abaixo cada uma das principais camadas da configuração demonstrada na Figura 3, desde a fundação ao revestimento.

2.3.1. Subleito

Fundação do pavimento constituído de material natural estável e compactado, pode o material resultante do próprio corte do corpo que receberá o projeto, ou transportado de aterro e compactado. As tensões recebidas pelas camadas superiores são geralmente dissipadas no primeiro metro de profundidade da camada (BALBO, 2007).

2.3.2. Reforço do Subleito

Camada executada sobre o subleito, com intuito de receber as pressões de maior magnitude e dissipá-las de forma que a camada inferior receba cargas menores, compatíveis com a sua resistência. Essa camada, portanto, deve ter material de melhor qualidade capaz de resistir a maiores solicitações.

A ausência desta camada não desconfigura um pavimento, no entanto, sua adição, a grande maioria das vezes torna o projeto mais econômico, visto que, ao inseri-la no projeto, as

camadas superiores de base e sub-base não precisariam ter maiores espessuras para resistir aos esforços aplicados (BALBO, 2007).

2.3.3. Sub-Base

Os materiais da sua composição devem proporcionar a essa camada características drenantes, de boa resistência mecânica, tornando essa, uma camada com estabilidade que não apresente grandes alterações volumétricas. Com relação a camada de base, a sub-base tem qualidade resistiva inferior, apresentando uma curva granulométrica mais deficiente e pouca plasticidade. No entanto, essas características devem ser superiores às encontradas nas camadas inferiores a essa (PINTO; PREUSSLER, 2010).

Balbo (2007) mostra que a implementação dessa camada ocorre geralmente por questões econômicas e construtivas, quando a camada base apresenta espessuras elevadas, sendo viável e recomendável a divisão dessa em duas de espessuras menores.

2.3.4. Base

Podendo ser constituída de solos naturalmente estabilizados, misturas de solo e agregados, solos quimicamente estabilizados, britas graduadas e outros tantos materiais e tratamentos, essa camada antecede o revestimento e tem como principal função fornecer suporte estrutural ao pavimento, de modo contribuir como a rigidez e resistências necessárias para que a estrutura suporte principalmente os esforços de fadiga ao qual estará submetida.

Além disso, outra função importante é dá a sustentação necessária ao revestimento de modo a evitar deformações prematuras devido as grandes intensidades de tensões ao qual está sujeito. Nessa camada os esforços devem ser dissipados de forma que as parcelas recebidas pelas camadas inferiores sejam compatíveis com suas resistências. (BALBO, 2007; PINTO e PREUSSLER, 2010).

2.3.5. Revestimento

Dentre outras funções, a camada superior do pavimento é responsável por receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou, ainda, perda de compactação. Por esse motivo, os materiais que a compõe este bem unidos ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal (BALBO, 2007).

Assim como as bases, por razões econômicas, técnicas e construtivas os revestimentos podem ser subdivididos em duas ou mais camadas, essas camadas são nomeadas e distinguidas de acordo com o apresentado no Quadro 1.

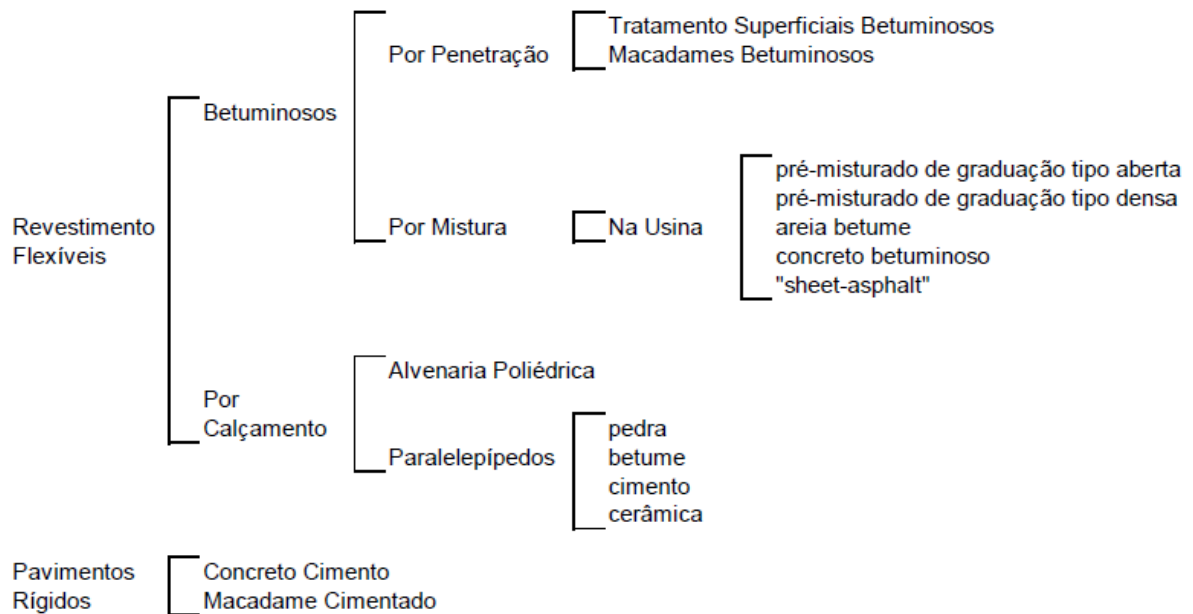
Quadro 1-Termos aplicáveis de revestimento asfáltico

DESIGNAÇÃO DO REVESTIMENTO	DEFINIÇÃO	ASSOCIAÇÕES
Camada de rolamento	É a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais	Camada de desgaste, capa de rolamento, revestimento
Camada de ligação	É a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento	Camada de <i>binder</i> ou simplesmente <i>binder</i>
Camada de nivelamento	Em geral, é a primeira camada de mistura asfáltica empregada na execução de reforços (recapeamento), cuja função é corrigir os desníveis em pista, afundamentos localizados, enfim, nivelar o perfil do greide para posterior execução da nova camada de rolamento	Camada de reperfilagem ou simplesmente reperfilagem
Camada de reforço	Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões funcionais, estruturais ou ambas	“Recape” e recapeamento são termos populares (usa-se também a expressão “pano asfáltico”, que muitas vezes parece comprometer menos

Fonte: BALBO (2007, p. 41).

Além dessa classificação, os revestimentos são também agrupados segundo sua natureza, junção, processo e composição como mostra o esquema apresentado no Manual de Pavimentação de 2006, do DNIT, apresentado na Figura 4.

Figura 4- Classificação dos revestimentos



Fonte: DNIT (2006, p. 98).

Cada mistura asfáltica apresenta em sua composição um tipo de graduação específica para os agregados, que irá conferir a mistura características específicas que lhes forem necessárias. Segundo Bernucci et al. (2010), as graduações de agregados podem ser divididas em três classes, sendo elas do tipo aberta, utilizada na dosagem da camada porosa de atrito, densa e descontínua como definido a seguir:

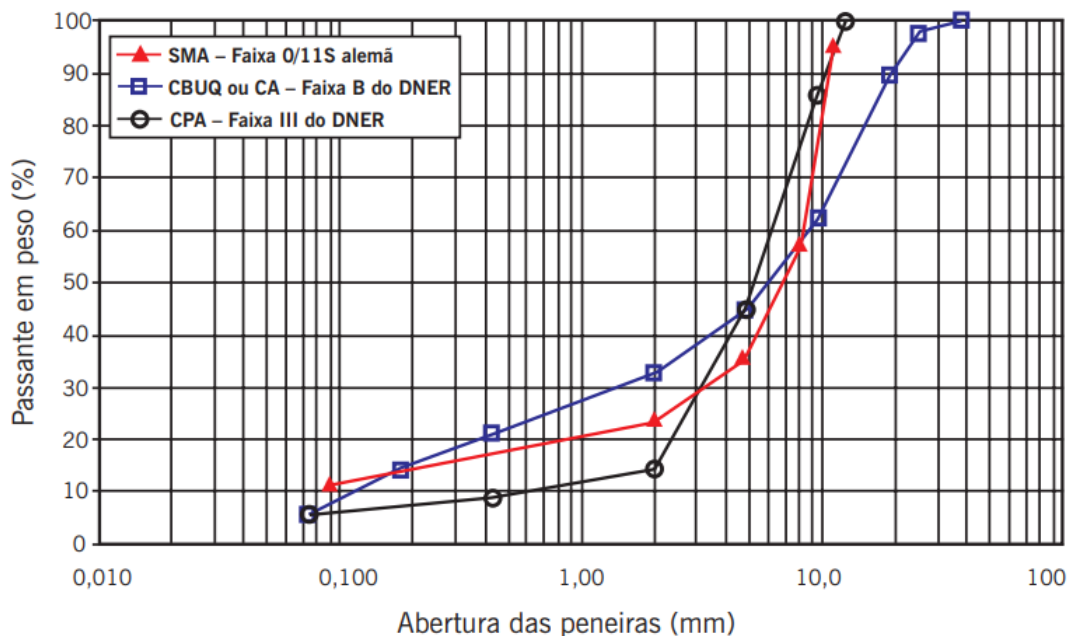
Graduação densa: curva granulométrica contínua e bem-graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios visto que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores.

Graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho, de forma a proporcionar um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados, tornando a mistura portanto drenante, possibilitando a percolação de água no seu interior.

Graduação descontínua: curva granulométrica com proporções de grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras, com o objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos.

Com intuito de comparação Bernucci et al. (2010) apresentam as curvas granulométricas utilizadas por três diferentes misturas, uma para cada definição quanto a graduação dos agregados, são elas: CBUQ para a graduação densa; CPA para a graduação aberta e Matriz pétreo asfáltica (stone matrix asphalt – SMA) para a graduação descontínua, como mostra a Figura 5.

Figura 5- Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente.



Fonte: BERNUCCI et al. (2010, p. 160).

O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), um dos tipos mais empregados no Brasil, é uma mistura a quente, entre agregados de graduação densa e cimento asfáltico, em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante. Já a CPA – objetivo de estudo desta pesquisa – são caracterizadas pelo emprego de uma graduação aberta de agregados, com ou sem fíler, que incorra em uma porcentagem de vazios entre 18% e 25% na mistura. E por último a Matriz Pétreo Asfáltica, curva em vermelho, apresenta uma configuração gradual descontínua, caracterizada por ser muito resistente a deformações permanentes. (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2010).

2.4.CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)

2.4.1. Caraterísticas

De acordo com Bernucci et al. (2010), a CPA é um tipo de mistura asfáltica empregada como revestimento de pavimentos que apresenta algumas particularidades para sua obtenção e características próprias quando em uso, como a drenagem. Balbo (2007) coloca ainda que com o emprego de CPA, houve uma relativa melhoria quanto à redução de ruídos gerados por veículos.

Para as normas DNIT-ME 386/99 e ASTM D7064-13 a camada porosa de atrito é definida como mistura asfáltica com índice de vazios mínimo de 18%, a norma brasileira por sua vez, define ainda um limite superior para os índices de vazios de 25%. Essa mistura é preparada em usina a quente, composta de agregados, material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico que pode ser ou não modificado polímero do tipo estileno-butadieno-estileno ou SBS, espalhado e comprimido a quente.

A norma DNIT-ME 386/99, apresenta ainda alguns fatores que influenciam diretamente na dosagem das misturas e nas propriedades que se buscam atingir, sendo esses: a quantidade de asfalto, o grau de compactação, a granulometria da mistura dos agregados, a temperatura e viscosidade do asfalto. As misturas do tipo CPA devem apresentar curvas granulométricas uniformes, de agregados quase exclusivamente de um único tamanho e pouca proporção de material fino, que mantêm grande porcentagem de vazios com ar, não preenchidos graças às pequenas quantidades de fíler, de agregado miúdo e de ligante asfáltico.

Quanto aos teores de ligante asfáltico contidos em uma camada de CPA a norma, brasileira recomenda porcentagens entre 4,0 e 6,0%, já a americana recomenda porcentagens maiores entre 6,0 e 6,5%, de ligante com relação ao peso de agregado. Para esse tipo de revestimento recomenda-se o emprego de asfalto modificado por polímero, afim de aumentar a durabilidade e reduzir a desagregação, como afirma Bernucci et al (2010), ainda segundo o autor o ligante utilizado deverá ter baixa suscetibilidade térmica e alta resistência ao envelhecimento. Além disso o autor afirma que as porcentagens estabelecidas na norma do DNIT-ME 386/99, podem ser reduzidas a depender da particularidade granulométrica do tipo de agregado, forma, natureza, viscosidade e tipo de ligante.

No tocante a durabilidade e degradação desse tipo de mistura asfáltica, Meurer Filho (2001) descreve que diversos danos em uma CPA acontecem devido ao desprendimento do ligante na interface do mesmo com o agregado. Este processo de degradação pode ser acelerado

por causa da ação da água e da umidade. Para o autor, a resistência de uma mistura asfáltica depende dentre outros fatores, do intertravamento, do arranjo dos agregados e, da capacidade de coesão do ligante asfáltico.

Por este motivo, Meurer Filho (2001) ainda descreve que os fatores tráfego e clima devem ser especialmente considerados na seleção dos ligantes. Para justificar essa afirmação o autor explica que asfaltos mais moles, que possuem alta penetração podem conduzir a deformações permanentes nas misturas sob altas temperaturas, especialmente sob tráfego pesado e, por sua vez, asfaltos mais duros podem produzir uma camada quebradiça em clima frio.

No tocante a dosagem e compactação, Bernucci et al. (2010) e a norma DNIT-ME 386/99 estabelecem que a dosagem de uma camada CPA deve ser realizada pelo método Marshall, prevalecendo o volume de vazios requerido e a compactação por impacto. A metodologia Marshall apesar de ser amplamente utilizada no Brasil e em vários outros países devido à sua praticidade e ao fato de não precisar de equipamentos muito avançados para sua implementação, vem perdendo espaço para a metodologia Superpave, que é menos empírica e faz uso de equipamentos mais sofisticados que permitem um melhor projeto da mistura. Essa metodologia é aplicada na dosagem de misturas abertas, pela ASTM D7064-13.

Nesse contexto, Del Carpio (2014) e Knabben (2017) destacam que para a dosagem de uma mistura porosa ainda não é embasada em método único e normativo, e que a dosagem realizada por meio do compactador giratório Superpave foi desenvolvida, basicamente, para misturas densas. Sendo assim, é possível que se dose misturas asfálticas porosas pela metodologia Superpave.

2.4.2. Propriedades da CPA

2.4.2.1. Propriedades Resistentes

Para Balbo (2007) a pouca área de contato entre ligante e agregados é a grande causa da degradação de uma mistura asfáltica aberta e muito porosa. Ele associa esse fato aos altos índices de permeabilidade desse tipo mistura, que permite a percolação de água e outros líquidos que degradam as ligações de asfalto. Desse ponto de vista é entendível as recomendações pelo emprego de ligantes modificados com polímero para tornar a mistura mais resistente e menos suscetível à ação da água.

Vários estudos acerca das CPA demonstram que a propriedade resistente mais afetada nesse tipo de mistura é a perda de massa. Meurer Filho (2001) analisou a resistência das misturas drenantes, por meio do ensaio de perda de massa, em três etapas e concluiu que para uma determinada granulometria, o teor de ligante asfáltico influenciou no comportamento das misturas drenantes quanto aos teores de vazios, aos teores de vazios comunicantes e às perdas no ensaio Cântabro; o autor comprovou em suas análises que para teores de ligante crescentes as percentagens de vazios, percentagens de vazios comunicantes e as perdas no ensaio Cântabro foram decrescentes.

Watson et al. (2004) avaliaram em sua pesquisa o desempenho de misturas asfálticas dosadas a partir das metodologias Marshall e Superpave. Um dos ensaios realizados para avaliação de desempenhos foi o ensaio de perda de massa Cântabro, utilizado para avaliar a durabilidade e a perda de resistências ao desgaste da mistura. Quando comparados os dois métodos, observaram que o tamanho da amostra não afetou significativamente os resultados dos testes, quando feitas comparações entre os 100 mm de diâmetro das amostras moldadas pelo Marshall e os 150 mm de diâmetro das amostras moldadas pelo método Superpave.

No contexto de resistência a tração, pesquisas como a de Roseno (2005) mostram que os índices de vazios e o tipo de ligante utilizado interferem diretamente no quão resistente será a camada de atrito porosa aplicada. Segundo Roseno (2005), em sua pesquisa, corpos de prova moldados com 3,5% e 4,0% de asfalto borracha, em condições similares de temperatura de mistura, mas compactados em energias diferentes para diferenciar os índices de vazios, apresentam redução em torno de 33% no valor da resistência à tração nos corpos de prova em que houve um aumento de 5% a 6% na percentagem de vazios.

Para Punith et al. (2012) o teor de ligante influenciou consideravelmente a perda de massa por abrasão, o autor concluiu que quanto mais baixo teor de ligante maior é a perda por abrasão nas misturas de CPA. Nesta pesquisa, Punith et al. (2012) concluíram também que, o uso de um ligante modificado na mistura de CPA reduziu expressivamente as perdas. O tipo de compactação aplicado sobre as misturas também influenciou a perda por abrasão. E como conclusão os resultados do autor indicaram, que devido à rigidez, propiciado pelo uso fibras ou ligantes modificados reduziram consideravelmente a perda por abrasão para as misturas investigada.

2.4.2.2. Propriedades Hidráulicas

A lâmina d'água sobre o pavimento pode causar acidentes uma vez que provoca derrapagens em virtude dos fenômenos de hidroplanagem e da viscoplanagem, prejudica a visibilidade pela névoa formada atrás dos veículos em movimento e pela reflexão luminosa durante a noite, além de acumular água nas deformações. Como solução para essa problemática a engenharia de pavimentos desenvolveu as misturas asfálticas drenante, trazendo bons resultados em muitos países. (GUIMARÃES et al., 2013)

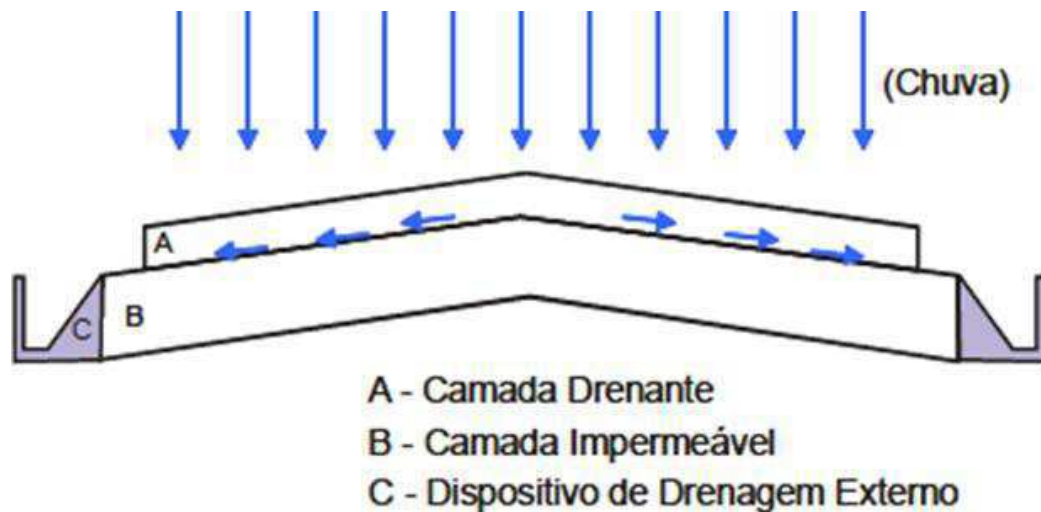
Desse modo, as camadas do tipo CPA são incluídas as obras de pavimentação com o principal objetivo de promover a drenagem superficial do pavimento, por meio da percolação da água pelos vazios da mistura. Para uma correta análise das propriedades hidráulicas da mistura, deve-se inferir o processo onde os vazios estão distribuídos em seu interior.

A drenabilidade de um pavimento é a capacidade de escoar a água superficial por entre suas rugosidades em função da macrotextura, dependendo da forma, tamanho e densidade dos granulares. O escoamento d'água acontece entre as rugosidades do pavimento sobre sua superfície que não é suficiente para inundar a rugosidade até recobrir todos os granulares; e sobre as rugosidades, quando a lâmina recobre toda a superfície. (MOMM 1998)

Oliveira et al. (2003) afirmam que para que o revestimento cumpra sua função drenante e o pavimento não seja danificado pela percolação dos fluidos no interior das camadas torna-se imprescindível que o projeto conte com uma camada impermeável com um adequado declive transversal, com o propósito de prevenir que a água atinja a sub-base ou que ocorra a sua estagnação no interior do revestimento poroso. Com essa configuração, as águas pluviais dirigem-se aos dispositivos de drenagem, onde é coletada, reduzindo ou até mesmo eliminando a formação da lâmina d'água sobre a superfície de rolamento, aumentando a segurança no trânsito em dias chuvosos.

A Figura 6 apresenta, de forma ilustrativa, o princípio de funcionamento dos pavimentos drenantes. Nas rodovias, o dispositivo de drenagem é substituído pelo acostamento.

Figura 6- Funcionalidade da camada porosa de atrito - CPA



Fonte: (ROSENO, 2005)

É possível determinar a permeabilidade de uma camada drenante por meio de ensaios laboratoriais ou diretamente em campo, independente da forma de realização todos os ensaios para determinação de permeabilidade se baseiam na lei de Darcy uma vez que o fluxo através da camada drenante pode ser considerado de regime laminar. De acordo com esta lei, a velocidade com que um dado volume de água atravessa uma seção transversal à direção do fluxo é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, sendo a constante de proporcionalidade ao coeficiente de permeabilidade do material. (PORTO, 1999).

2.5. NORMATIZAÇÃO

A camada porosa de atrito é especificada pelas normas de misturas abertas, cada país tem sua norma ou especificação de serviço própria, no Brasil a CPA é normatizada pela *DNIT-ME 386 de 1999*, nos Estados Unidos esse tipo de mistura é regulamentado pela *ASTM D7064-13*. Nos próximos tópicos serão apresentados alguns pontos importantes de cada uma dessas especificações.

2.5.1. DNIT-ME 386/99

Para Bernucci et al. (2010) e a norma DNIT-ME 386/99 a CPA necessita de dosagem pelo método Marshall, prevalecendo o volume de vazios requerido, devendo seus agregados ser 100% britados e com abrasão Los Angeles $\leq 30\%$, para não serem quebrados na compactação, pois estão em contato uns com os outros e a tensão é muito elevada durante o processo de densificação. Para ter um contato efetivo dos agregados, estes precisam ser cúbicos com o

índice de forma $\geq 0,5$, com absorção de água para cada fração de, no máximo, de 2% e a sanidade deve apresentar perda de $\leq 12\%$.

A especificação de serviço brasileira do DNIT-ME 386/99 estabelece 5 faixas granulométricas e os requisitos para o projeto de dosagem da CPA baseados na avaliação dos parâmetros volumétricos pelo método Marshall, 50 golpes/face (DNIT – ME 043), da resistência ao desgaste por abrasão, por meio do ensaio Cântabro DNIT-ME 383/99, e à tração por compressão diametral DNIT-ME 136/18. Na Tabela 1, as faixas I e II são recomendadas para espessuras de camadas de 3,0 cm, e as faixas III, IV e V são recomendadas para espessuras de até 4,0 cm.

Tabela 1- Faixas granulométricas e requisitos de dosagem da CPA – DNIT-ME 386/99

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso (faixas)					Tolerância na curva de projeto (%)
ABNT	Abertura, mm	I	II	III	IV	V	
3/4"	19,0	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,5	100	100	100	100	70-100	± 7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	± 7
Nº 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	± 5
Nº 10	2,0	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	± 5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	± 5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	± 3
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	± 2
Ligante polimerizado solúvel no tricloroetileno, %		4,0 - 6,0					$\pm 0,3$

Fonte: (DNIT-ME 386, 1999)

A DNIT-ME 386/99, determina que a mistura deve ser preparada em usina a quente, composta de agregados, material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico que pode ser ou não modificado polímero do tipo estileno-butadieno-estileno ou SBS, espalhado e comprimido a quente.

Além disso determina os ensaios e índices que devem ser levados em consideração nas análises. São esses:

- Desgaste los angeles máximo de 25,0%;
- Durabilidade, perda máxima de 12,0%;
- Compactação ensaio Marshall (DNIT-ME 043/1995);

- Porcentagem de ligante entre 4,0 – 6,0%, para ligantes modificados por SBS;
- Porcentagem do volume de vazios entre 18,0 – 25,0 %;
- Perda por abrasão cantabro máxima de 25%;
- Resistência à tração por compressão diametral mínimo de 5,5kgf/cm² ou 0,55MPa.
- Compactação em campo, rolo metálico liso tipo tandem, até atingir a densidade requerida.

2.5.2. ASTM D7064-13

A norma dos EUA, não se refere diretamente ao CPA, diferentemente da especificação brasileira, no entanto, a norma é destinada a misturas de granulometria aberta, categoria a qual o CPA faz parte. As misturas abertas normatizadas pela ASTM D7064-13 são utilizadas para reduzir a hidroplanagem e permitir drenagem livre, onde a água da superfície convirja lateralmente para as bordas do pavimento.

Entre as recomendações contidas na especificação americana estão:

- Dimensões para dosagem: molde com diâmetro de 100 mm e altura de 63,5 mm;
- Compactação no Compactador Giratório SUPERPAVE® (CGS) com 50 giros;
- Porcentagem de ligante entre 6,0 – 6,5%, para ligantes sem aditivos;
- Volume de vazios mínimo de 18%;
- Perda por abrasão cantabro máxima de 20%;
- Susceptibilidade à água, também conhecido por dano por umidade induzida é normatizada pela norma AASHTO T 283 (2011), mínima de 80%.

2.6. LIGANTE ASFÁLTICO

Bernucci et al. (2010) definem o asfalto utilizado em pavimentação como um ligante betuminoso, produto da destilação do petróleo e que apresenta propriedade de ser um adesivo termoviscoelástico, impermeável à água e pouco reativo. A característica de pouca reatividade, no entanto não impede que esse material passe por um processo de envelhecimento por oxidação pelo contato com o ar e a água.

Para Bernucci et al (2010), o ligante asfáltico é um produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo, à intensidade de carregamento e à temperatura de serviço. O

ligante asfáltico é um material quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono, propriedade que será utilizada como um dos requisitos de especificação.

2.6.1. AMP 55-75

O ligante asfáltico AMP 55/75-E trata-se de um produto obtido a partir da modificação do ligante por polímeros elastoméricos. Essa modificação permite que esse ligante forneça aos pavimentos propriedades superiores aos comuns, minimizando assim falhas recorrentes, como a deformação permanente e trincamento por fadiga, proporcionando maior vida útil aos revestimentos asfálticos, esse tipo de ligante é bastante usado em projetos em que os revestimentos exigem mais das propriedades do ligante, como é o caso das camadas porosas de atrito.

2.7. AGREGADOS

Benucci et al. (2010) definem agregado como sendo um termo genérico utilizado para areias, pedregulhos e rochas minerais, estejam essas em seu estado natural ou britadas em seu estado processado. Para o autor a escolha desses materiais para um projeto de pavimentação deve levar em consideração sua capacidade de resistir às tensões aplicadas na superfície e interior do revestimento.

Os agregados são classificados segundo Benucci et al. (2010), quanto a natureza, tamanho e forma e distribuição dos grãos.

Quanto a natureza temos:

- Natural: nesta classe estão todos os materiais de ocorrência natural, que podem ser obtidos por meio de processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. Podem ser utilizados da forma como são encontrados na natureza podem passar por processos como o de britagem.
- Artificial: São produtos de procedimentos industriais ou fabricados especificamente objetivando o alto desempenho.
- Reciclado: Provém da reutilização de materiais. Sua utilização vem aumentando devido às restrições ambientais na exploração de novas jazidas bem como o aperfeiçoamento nas técnicas de reciclagem.

Quanto ao tamanho:

- Graúdo: material retido na peneira de N° 10, ou seja, materiais com dimensões maiores do que 2,0mm.
- Miúdo: material retido na peneira de no 200, ou seja, com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. É o material que é, mas que passa na de abertura no 10.
- Material de enchimento (fíler) – é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm.

2.8.COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS)

2.8.1. Histórico

Segundo Harman et al. (2002) o conceito de compactação giratória surge na década de 1930 e é atribuído aos engenheiros do Departamento de Rodovias do Estado do Texas, EUA, Philippi, Raines e Love. Em 1939, este departamento passou a desenvolver pesquisas sobre projeto e controle de misturas asfálticas.

Para tanto, determinaram dois principais critérios que regeriam os métodos para avaliações em laboratório, o primeiro critério define que o método deveria ser adaptável tanto ao controle de campo das misturas quanto ao projeto, o segundo método, deveria produzir essencialmente a mesma densidade, ou razão de vazios, que aquela obtida no pavimento acabado. O primeiro equipamento de compactação giratório do Texas, utilizados em pesquisas de 1939 a 1946 era manual.

Ainda de acordo com Harman et al, o primeiro compactador por amassamento giratório foi desenvolvido nos anos 50, por John L. McRae, do Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano. A necessidade da criação de um compactador com sistema de amassamento giratório, surgiu quando pesquisas da época já indicavam que a compactação por impacto Marshall não simulava apropriadamente as densidades das misturas nas trilhas das rodas sob tráfego pesado, tão pouco as propriedades mecânicas das amostras extraídas dos pavimentos.

O sistema desenvolvido por McRae consiste na aplicação da ação giratória com uso de um mecanismo de dois pontos, que permite ao ângulo de giro ser modificado durante a compactação. Além do ângulo, o equipamento também mede a pressão no mecanismo de dois pontos e a altura da amostra. O engenheiro batizou o compactador de máquina de ensaio

giratório ou (GTM – Gyrotory Test Machine). A compactação por amassamento tem se sobreposto ao método de compactação Marshall, por reproduzir mais fielmente a compactação em campo. Este sistema é similar aos encontrados nas máquinas de compactação atuais, inclusive este é o sistema do compactador utilizado nesta pesquisa.

2.8.2. Servopac Gyrotory Compactor- ICP Global®

O compactador utilizado nesse estudo é o *Servopac Gyrotory Compactor* da ICP Global® (Figura 7), citados nesta pesquisa como Compactador Giratório Superpave, ou apenas CGS, nomenclatura que ficaram conhecidos os equipamentos com princípio de compactação por amassamento.

Segundo a folha de especificações, disponibilizado pelo fabricante, trata-se um compactador giratório totalmente automatizado e controlado por servo, projetado para compactar misturas asfálticas por meio da técnica de compactação giratória. A compactação nesse dispositivo é obtida pela ação simultânea da compressão estática e da ação de cisalhamento resultante da rotação do molde em um ângulo em torno do seu eixo longitudinal, simulando o amassamento da mistura.

A máquina possui algumas características em sua estrutura que proporcionam ao operador maior segurança e o mínimo de esforço manual para manuseio dos moldes preenchidos de misturas asfálticas quentes e pesadas. O acesso do molde a câmara de compactação é feito pela bancada, onde o molde pode ser deslizado, a extração dos corpos de prova compactados é feita por um mecanismo operado pneumaticamente.

No CGS a tensão vertical é medida por uma célula de carga e o movimento giratório também é servo-controlado, permitindo que o ângulo giratório, bem como a tensão vertical aplicada e velocidade sejam controlados e modificados durante a compactação, por meio de controle manual ou no computador. O software para controle do CGS fornece uma tela para inserir parâmetros de teste e exibir e traçar a altura, densidade ou ângulo em relação aos ciclos giratórios em tempo real. Os dados de teste podem ser armazenados e recuperados ou transferidos para outros pacotes de análise.

Figura 7- Compactador Giratório SUPERPAVE



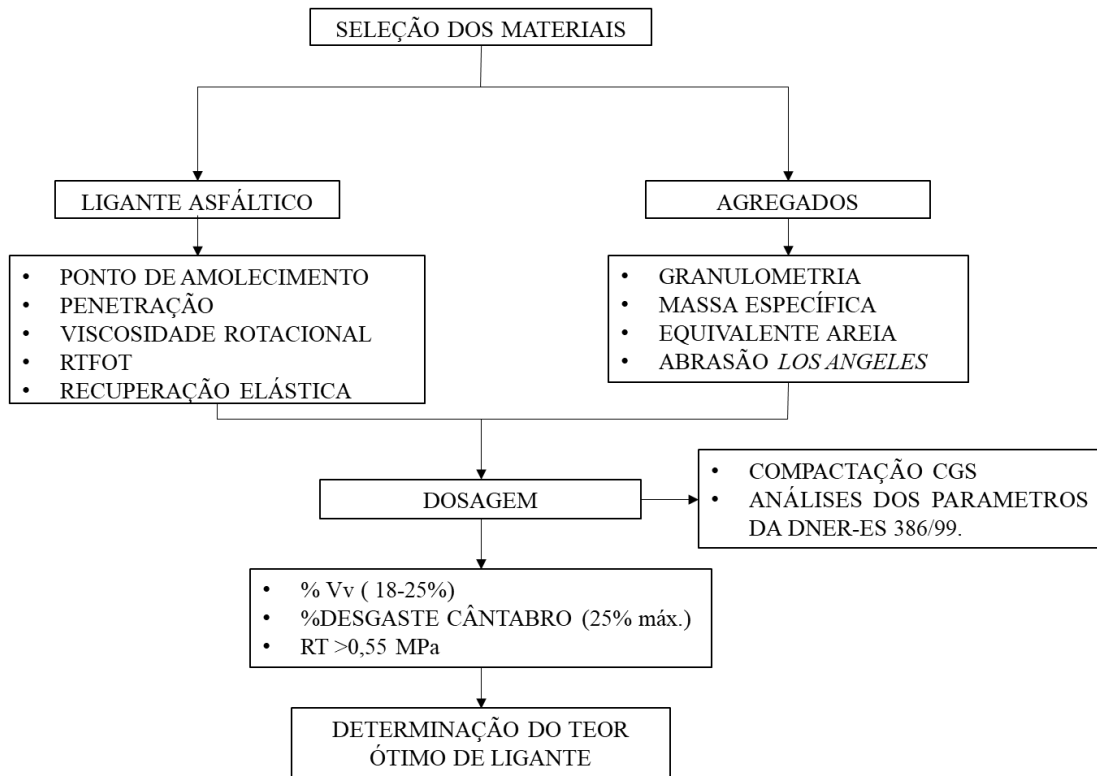
Fonte: (LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será demonstrado o procedimento experimental desenvolvido nesta pesquisa, onde serão apresentados os aspectos referentes aos materiais selecionados e aos métodos e especificações empregados para a realização dos ensaios de caracterização física dos agregados, caracterização física dos ligantes, além da caracterização mecânica e hidráulica das misturas asfálticas.

A primeira etapa do trabalho foi constituída na caracterização física dos agregados e do ligante, dando condições para a realização da dosagem na qual foram utilizados como parâmetros os limites estabelecidos pela norma DNIT-ME 386/99 e a moldagem dos corpos de prova realizadas por meio do CGS, como esquematizado na Figura 8.

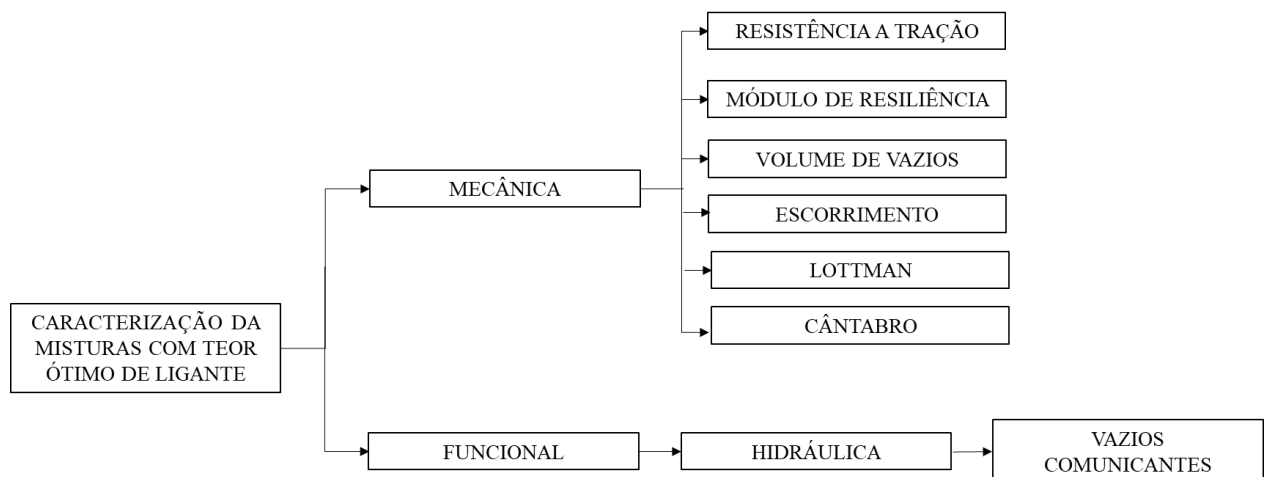
Figura 8-Esquemática da primeira etapa da pesquisa



Fonte: (AUTOR, 2021).

Na segunda etapa, foi realizada a caracterização funcional e mecânica das misturas com teor ótimo de ligante encontrado na dosagem. O programa experimental seguido, segue detalhado na Figura 9.

Figura 9-Esquema da segunda etapa da pesquisa



Fonte: (AUTOR, 2021)

Para a realização de todas as etapas, essa pesquisa seguiu o estabelecido pelas normas regulamentadoras, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, da American Society for Testing Materials – ASTM, do DNIT e da AASHTO. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos (LEP) – UAEC/UFCG.

3.1.MATERIAIS

3.1.1. Ligante Asfáltico: AMP 55/75-E

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o AMP 55/75- E, adquirido na obra na BR 230 – Paraíba. A Tabela 2 apresenta a caracterização física do ligante, bem como as normas referentes a cada ensaio e seus limites. Todos os ensaios de caracterização do ligante, com exceção do ensaio de recuperação elástica, foram repetidos após o envelhecimento, por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico de cada mistura, em movimento, por meio do Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT). Este procedimento é útil na identificação de possíveis mudanças nas propriedades do ligante que podem ocorrer durante a usinagem a 150°C. Os resultados foram utilizados para verificar se o ligante atende aos requisitos para utilização nesta pesquisa.

Tabela 2- Caracterização do ligante AMP 55/75-E

CARACTERÍSTICA	ANTES RTFOT	APÓS RTFOT	LIMITES	MÉTODOS
Penetração (0,1mm)	57	47	45 -70	DNIT-ME 155/2010
Ponto De Amolecimento (°C)	48,5	65,75	55 (mín.)	DNIT-ME 131/2010
Recuperação Elástica (%)	76	-	75 (mín.)	DNIT-ME 130/2010
Viscosidade Rotacional 135°C (cP)	1577,5	2451,3	3000 (máx.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 150°C (cP)	726,0	1059,0	2000 (máx.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 177°C (cP)	245,5	325,0	1000 (máx.)	NBR-15184
RTFOT- Variação De Massa (%)	0,0205	-	0,5 (máx.)	ASTM D 2872/97

Como mostra a Tabela 2, todos os resultados obtidos nos ensaios, antes e após o envelhecimento do ligante, estão dentro dos limites estabelecidos por suas respectivas normas viabilizando assim, o uso do ligante nesta pesquisa. O resultado variação de massa obtida pelo ensaio de RTFOT está dentro do limite de 0,5% estabelecido pela norma 095/2006 do DNIT,

assim o ligante encontra-se dentro da tolerância de envelhecimento sem interferir na qualidade do pavimento.

3.1.2. Agregados

Nesta pesquisa foram utilizados os agregados abaixo (Figura 10), fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante, oriundos de pedra própria com sede em Campina Grande – PB. As amostras fornecidas foram brita 19mm, brita 12,5mm e Pó de pedra. O filer utilizado nesta pesquisa foi a cal hidratada proveniente do comércio local.

Figura 10- Agregados utilizados na pesquisa



Fonte: (AUTOR, 2021)

Para caracterização dos agregados foram realizados os ensaios expressos na Tabela 3. Os resultados serão utilizados na determinação do teor de ligante para projeto de acordo com o estabelecido na especificação de serviço DNIT-ME 386/99.

Tabela 3- Ensaios e normas regulamentadoras para caracterização dos agregados

ENSAIOS	MÉTODOS
Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados	DNIT ME 083/1998
Determinação da massa específica dos agregados graúdos	DNIT ME 413/2019
Determinação da massa específica dos agregados miúdos	DNIT ME 411/2021
Abrasão Los Angeles	DNIT ME 035/1998
Equivalente areia	DNIT ME 054/1997

3.1.2.1. Granulometria dos Agregados

Para determinação da granulometria dos agregados esta pesquisa seguiu a metodologia de ensaio descrita na especificação 083 de 1998 do DNIT. As peneiras utilizadas são de malhas de abertura 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm, 19,1mm e 25,4mm, como mostra a Figura 11. O material utilizado foi colocado em estufa a 110°C por 4 horas para a retirada da umidade e o peneiramento foi realizado manualmente.

Figura 11- Conjunto de peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria.



Fonte: (AUTOR, 2021)

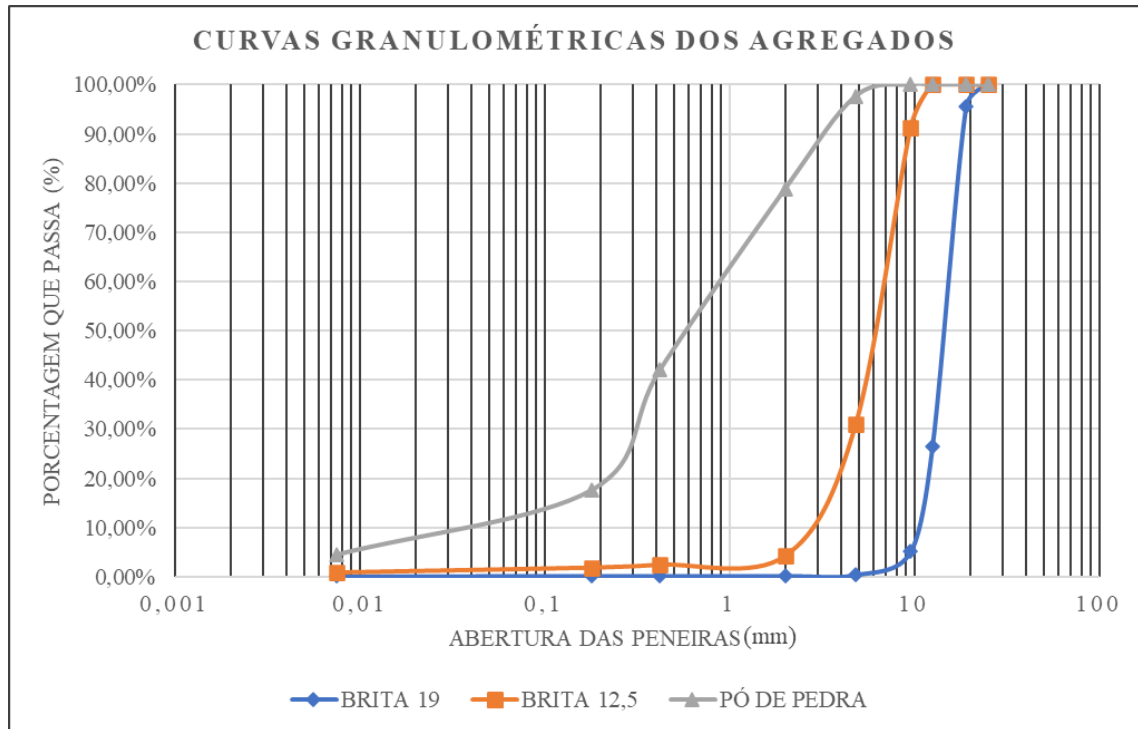
A Tabela 4 e a Figura 12 mostram, a quantidade passante para cada agregado e a curva granulométrica da composição granulométricas, respectivamente.

Tabela 4- Quantidade passante acumulada

PENEIRA	DIÂMETRO (mm)	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm	PÓ DE PEDRA
1"	25,40	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,10	95,48	100,00	100,00
1/2"	12,70	26,51	100,00	100,00
3/8"	9,50	5,09	91,18	100,00
Nº 4	4,80	0,43	30,98	97,64
Nº 10	2,00	0,24	4,27	78,91

Nº 40	0,420	0,24	2,47	42,05
Nº 80	0,180	0,22	1,90	17,66
Nº 200	0,074	0,16	0,88	4,50

Figura 12- Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: (AUTOR, 2021)

As curvas granulométricas da Figura 12, demonstram que os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa apresentam uma granulometria uniforme, já o pó de pedra apresentou uma granulometria densa.

3.1.2.2. Caracterização Física dos Agregados Graúdos

Os resultados da caracterização dos agregados graúdos utilizados nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Caracterização física dos agregados graúdos

ENSAIOS	LIMITES	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm
Massa Específica Real (g/cm³)	-	2,26	2,07
Massa Específica Aparente (g/cm³)	-	2,27	2,09
Absorção (%)	≤ 2	0,50	0,70

Abrasão Los Angeles (%)	≤ 55	18,97	22,16
--------------------------------	-----------	-------	-------

As massas específicas calculadas foram utilizadas no cálculo das densidades máximas da mistura. Para o índice de absorção pode-se concluir que o agregado utilizado nessa pesquisa é pouco poroso. Quanto ao desgaste por abrasão Los Angeles, o agregado apresentou-se dentro dos limites estabelecidos por norma de 55%. Portanto, os agregados graúdos foram considerados adequados para uso em misturas asfálticas.

3.1.2.3. Caracterização Física do Agregado Miúdo

Os resultados da caracterização do agregado miúdo utilizado nesta pesquisa, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Caracterização física do agregado miúdo

ENSAIOS	LIMITES	PÓ DE PEDRA
Massa Específica Real (g/cm³)	-	2,47
Massa Específica Aparente (g/cm³)	-	2,49
Absorção (%)	≤ 2	0,70
Equivalente Areia (%)	≥ 55	56,38

As massas específicas calculadas foram utilizadas no cálculo das densidades máximas da mistura. Para o índice de absorção o agregado utilizado apresentou baixa porosidade, quanto ao ensaio de equivalente areia, o agregado apresentou-se dentro dos limites estabelecidos por norma de 55%. Portanto, o agregado miúdo foi considerado adequado para uso em misturas asfálticas.

3.2.METODOLOGIA

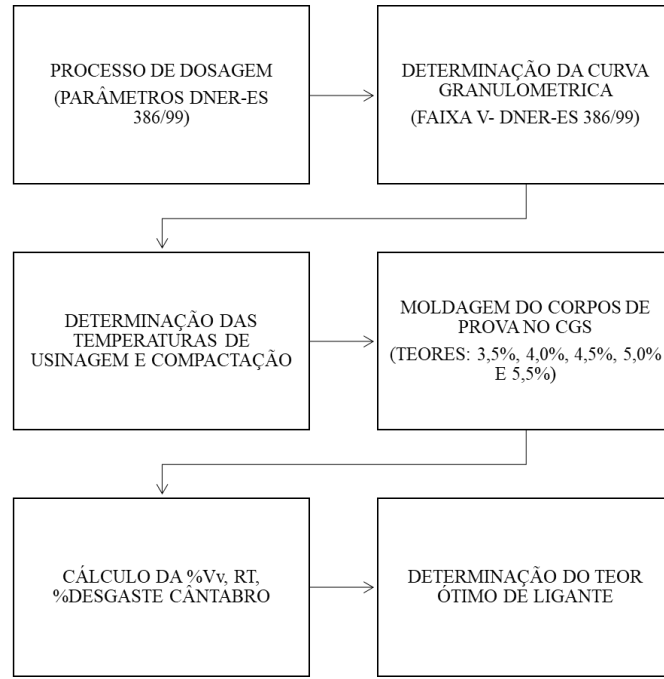
3.2.1. MÉTODO DE DOSAGEM

3.2.1.1.Composição Granulométrica

A fim de se determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura asfáltica estudada, realizou-se a dosagem, seguindo os parâmetros da especificação de serviço brasileira do DNIT-

ME 386/99 e que estabelece 5 faixas granulométricas e os requisitos para o projeto de dosagem da CPA. A sequência desenvolvida no processo de dosagem, está descrita no fluxograma da Figura 13.

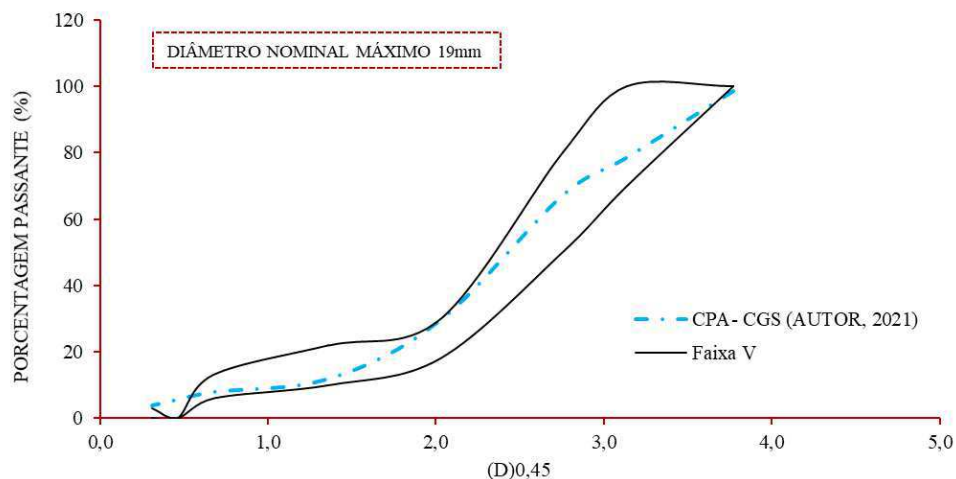
Figura 13-Fluxograma de dosagem



Fonte: (AUTOR, 2021)

Para determinação da composição granulométrica da mistura, analisou-se o resultado dos ensaios de granulometria dos agregados e constatou-se que a composição da mistura estudada se enquadra na faixa V recomendada pelo DNIT-ME 386/99, para CPA, como pode-se perceber pela Figura 14.

Figura 14- Curva da composição granulométrica do CPA.

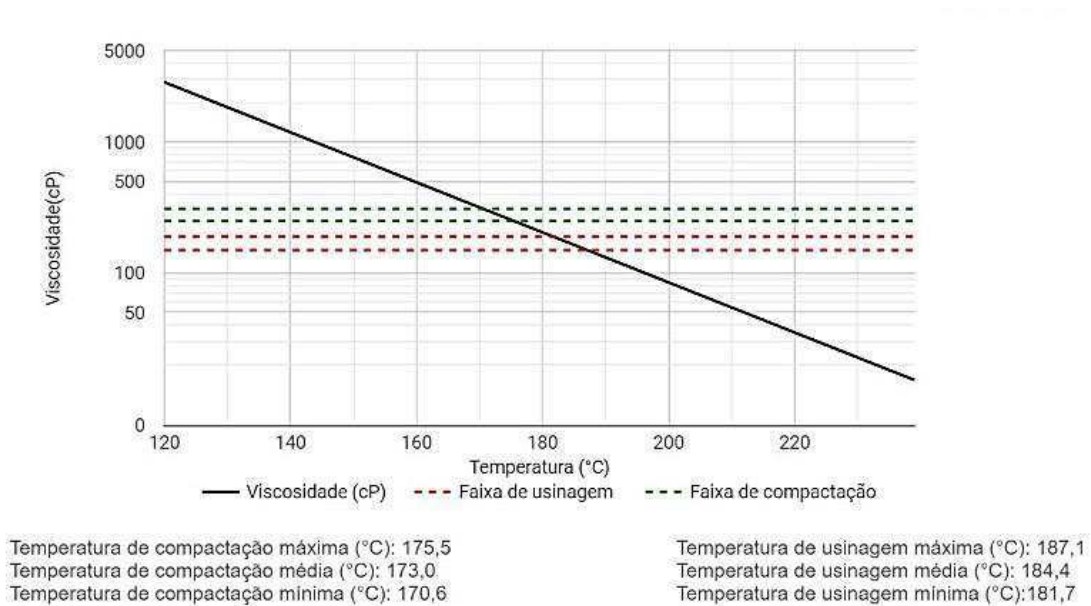


Fonte: (AUTOR, 2021)

Desta forma, a composição da mistura asfáltica do tipo CPA desta pesquisa, foi elaborada a partir de 29% de brita 19mm, 60% de brita 12,5mm, 8% de pó de pedra e para suprir uma carência detectada de finos foi acrescentado a mistura 3% de filer. A composição elaborada por Schneider (2016) se aproximou bastante da desenvolvida nesta pesquisa e também se enquadrou na Faixa V estabelecida pelo DNIT-ME 386/99.

A determinação das temperaturas de usinagem e compactação da mistura foram feitas graficamente a partir dos dados de viscosidade, temperatura e faixas predeterminadas de usinagem e compactação do ligante asfáltico AMP 55/75-E, por meio da correlação desses dados pode-se determinar as temperaturas mínima, média e máxima para compactação e usinagem da mistura, como expresso na Figura 15. Definir essas temperaturas é de extrema importância nas pesquisas sobre misturas asfálticas para evitar a oxidação do ligante por processamento em temperaturas superiores as suportadas.

Figura 15- Gráfico de viscosidade versus temperatura



Fonte: (AUTOR, 2021)

Os corpos de prova foram compactados em cinco teores de ligante distintos, observando o intervalo estabelecido pela DNIT-ME 386/99 de 4,0 a 6,0%. A princípio, os teores foram determinados acrescentando ao limite inferior (4,0%) +0,5% até que se alcançasse o limite superior (6,0%) estabelecido por norma, ficando a seguinte configuração de teores analisado 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5% e 6,0%.

Entretanto, nas primeiras misturas verificou-se que para teores acima de 5,0% a quantidade de ligante apresentava-se elevada, gerando grandes perdas do ligante no recipiente de mistura para evitar possíveis problemas como exsudação do ligante, foi decidido, excluir o maior teor e acrescentar um teor -0,5% ao limite inferior da norma, obtendo-se a seguinte configuração, 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%. Porcentagens semelhantes de ligante AMP 55/75-E foram utilizadas pelos autores Schneider (2016) (3,0%, 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%) e Cararo, Steiner e Del Carpio (2016), (3,0%, 3,5%, 4,0%, 4,5% e 5,0%).

A fim de determinar o teor ótimo, por meios dos ensaios de volume de vazios, determinação da perda de massa por abrasão cântabro e resistência à tração indireta por compressão diametral, foram compactados três corpos de prova para cada um dos teores. A compactação foi feita no CGS, configurado para realizar 50 giros, com pressão aproximada de 600 kPa e ângulo de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$, segundo a ASTM D7064 (2013).

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E HIDRÁULICA DA MISTURA CPA

Nesta pesquisa, os ensaios mecânicos e hidráulicos, apresentados na Tabela 7, permitiram analisar o comportamento das misturas asfálticas, mediante a dosagem realizada com base nos parâmetros determinados na especificação DNIT-ME 386/99 e a compactação com uso do CGS. Para que seja possível a análise, os corpos de prova foram sujeitos aos ensaios de caracterização, estabelecidos pela norma americana que regulamenta misturas abertas do tipo CPA, ASTM D7064 (2013).

O ensaio de caracterização hidráulica, permitiu que se verificasse a capacidade da mistura de manter sua característica funcional, sendo dosada pelos parâmetros da DNIT-ME 386/99 e compactada pelo CGS.

Tabela 7- Ensaio e normas utilizadas para caracterização mecânica e hidráulica das misturas.

ENSAIOS	MÉTODOS
Resistência à tração indireta por compressão diametral	DNIT ME 136/2018
Módulo de resiliência	NBR 16018
Determinação do dano por umidade induzida	DNIT-ME 180/2018
Determinação da perda de massa por abrasão cântabro	DNIT-ME 383/1999
Escorrimento do ligante	ASTM D6390
Volume de vazios	DNIT-ME 117/1994 e 427/2020
Vazios comunicantes	-

3.2.2.1. Determinação do volume de vazios

De acordo com a DNIT-ME 386/99, uma mistura asfáltica do tipo CPA deve apresentar um volume de vazios entre 18 e 25%. Nesta pesquisa para determinação do volume de vazios, foram determinados a densidade aparente pela especificação de serviço DNIT-ME 117/94 e a densidade máxima foi obtida por meio do ensaio Rice.

O procedimento determinado pela especificação 117 de 1994 do DNIT para cálculo da densidade aparente da mistura, consiste em pesar o corpo de prova ao ar, envolve-lo com fita, repetir o procedimento de pesagem, em seguida aplica-se uma camada de parafina que envolva todo o corpo de prova, pesando-o novamente, o procedimento está demonstrado na Figura 16. Por fim corpo de prova envolto por fita e parafina é submerso em água a 25°C, e obteve-se o peso submerso. De posse desses dados foi possível obter a densidade aparente.

Figura 16- Procedimento de ensaio para determinação da densidade aparente da mistura.



Fonte: (AUTOR, 2021)

Para determinar a densidade máxima da mistura foi realizado o ensaio pela metodologia Rice (Figura 17), segundo o estabelecido na norma 427 de 2020 do DNIT, onde a mistura para cada teor foi espalhada ainda quente sobre uma placa metálica e após atingir temperatura ambiente, as frações de misturas maiores foram separadas manualmente, após esse procedimento as amostras foram levadas ao agitador mecânico para retirada do ar contido em cada amostra.

Figura 17- Aparelhagem para determinação da densidade máxima da mistura (Rice)



Fonte: (AUTOR, 2021)

De posse dos resultados de cada ensaio foi possível calcular o volume de vazios da amostra por meio da Equação 1:

$$V_v(\%) = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right)$$

Onde:

Vv: índice de vazios (%);

Gmb: densidade aparente da mistura compactada;

Gmm: densidade máxima medida da mistura.

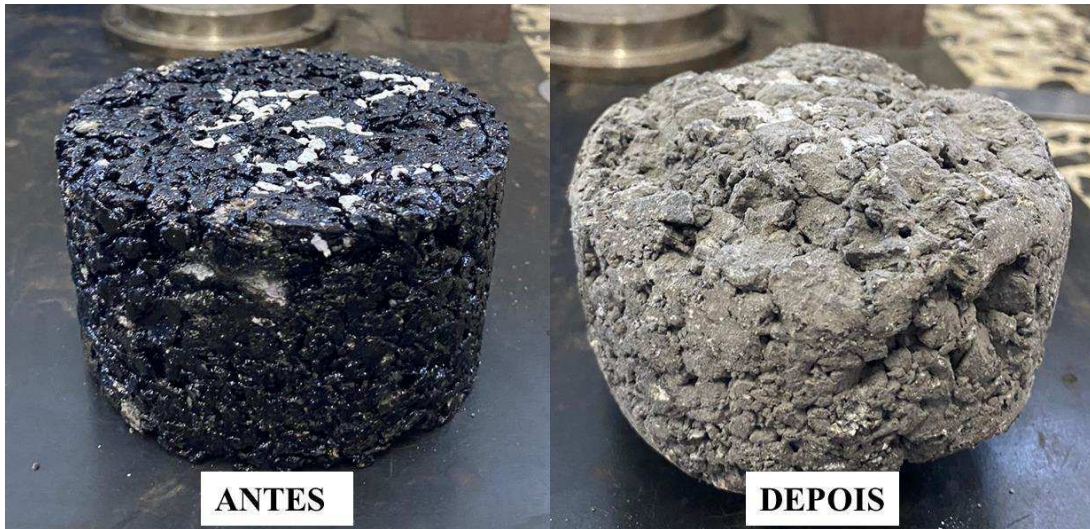
3.2.2.2. Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cântabro

Segundo a especificação 386/99 do DNIT, o ensaio Cântabro é um dos parâmetros importantes analisados para as misturas asfálticas do tipo CPA, não podendo o índice de desgaste ser superior a 25%.

Desta forma este ensaio foi realizado nesta pesquisa de acordo com o especificado na DNIT-ME 383/99. Onde os corpos de prova de cada amostra para cada teor de ligante distinto foram pesadas, colocadas, uma a uma, no tambor da máquina de *Los Angeles*, limpo e sem carga abrasiva, rotacionado por 300 vezes a 30 r.p.m e temperatura de 25°C.

Após esse processo o corpo de prova é retirado e pesado novamente, a Figura 18 mostra um corpo de prova antes e depois do processo de desgaste.

Figura 18-Corpos de prova antes e depois do ensaio Cântabro



Fonte: (AUTOR, 2021)

A porcentagem de desgaste foi calculada por meio da Equação 2:

$$A = \left(\frac{P - P'}{P} \right) \times 100$$

Onde:

A: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero, com aproximação de 1%;

P: peso do corpo de prova antes do ensaio;

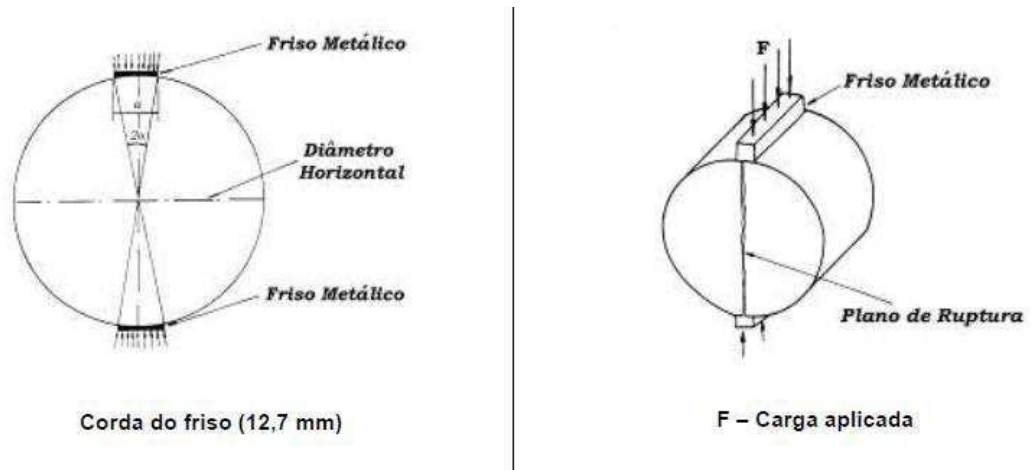
P': peso do corpo de prova após a realização do ensaio.

3.2.2.3. Resistência à tração indireta por compressão diametral

Segundo Medina e Mota (2015), originalmente desenvolvido para determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, o ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral vem sendo utilizado para determinar a resistência de corpos de prova de misturas asfálticas desde 1980.

Bernucci et al (2010) esclarece que o ensaio consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram tensões de tração perpendiculares ao diâmetro, como mostra a Figura 19.

Figura 19-Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral



Fonte: (DNIT, 2018)

O ensaio utilizado nessa pesquisa seguiu as recomendações da DNIT-ME 136/2018, que determina que, o corpo de prova deve ser mantido por, no mínimo, 4 horas em um compartimento com temperatura controlada de 25°C. Após esse período o corpo de prova deve ser acomodado em um dispositivo centralizador e levado à prensa (Figura 20).

Figura 20- Prensa para realização do ensaio de resistência a compressão diametral.



Fonte: (AUTOR, 2021)

A carga é aplicada a uma velocidade de 0,8 mm/s até a ruptura da amostra, após esse processo o valor de tensão é calculado por meio da Equação 3:

$$\sigma_R = \frac{2 * F}{\pi * D * H}$$

Onde:

σ_R : Tensão de tração (MPa);

F: Carga de compressão de ruptura (N);

D: Diâmetro da amostra (mm);

H: Altura da amostra (mm).

3.2.2.4. Módulo de Resiliência

O ensaio para determinação do módulo de resiliência da mistura asfáltica do tipo CPA, seguiu as recomendações estabelecidas pela associação brasileira de normas técnicas, na NBR 16018 de 2011, o ensaio foi realizado na prensa hidráulica UTM-25 da IPC, como mostra a Figura 21.

Figura 21- Prensa hidráulica UTM-25



Fonte: (AUTOR, 2021)

Este ensaio se fundamenta na aplicação repetida de uma carga no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico, essa aplicação de carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação e o valor de deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada é medido durante o ensaio. A NBR 16018/2011 determina a medição do deslocamento resiliente instantâneo, calculado pela deformação horizontal recuperável durante a fase de descarregamento de um ciclo de carga-descarga.

Nos corpos de prova da CPA, foi aplicada, com uma frequência de 60 ciclos por minuto, e tempo de aplicação de 0,10 segundos, uma carga igual a 10% da força da RT.

3.2.2.5. Determinação do Dano por Umidade Induzida

O ensaio de determinação do dano por umidade induzida foi realizado apenas nos corpos de prova compactados com teor ótimo de ligante determinado nesta pesquisa e seguiu as recomendações da especificação de serviço 180/2018 do DNIT, a especificação determina que a amostra para realização deste ensaio é de seis corpos de prova, subdivididos em dois grupos de amostras.

Um dos grupos foi submergido em um recipiente com água destilada, no qual foi aplicado um vácuo de 13 a 67kPa, durante 10 minutos (Figura 22).

Figura 22- Aplicação do vácuo nos corpos de prova



Fonte: (AUTOR, 2021)

Os corpos de prova devem atingir um grau de saturação mínimo de 55% para que o ensaio prossiga, após esse processo os corpos de provas foram embalados e congelados a -18°C por no mínimo 16h (Figura 23).

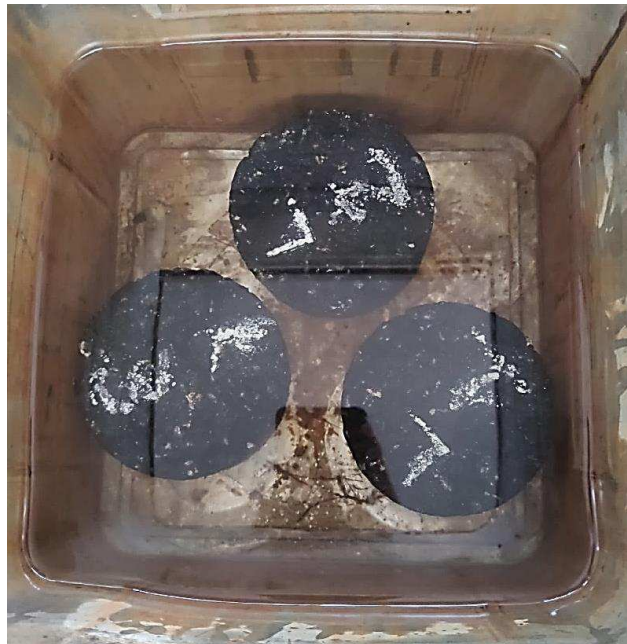
Figura 23- Corpos de prova após o processo de congelamento.



Fonte: (AUTOR, 2021)

Após o ciclo de congelamento os três corpos de prova foram levados para um banho de água a 60 °C durante 24h (Figura 24). Após esse período foram retirados e submergidos em um banho a 25°C por 2h. Só após esses processos os seis corpos de prova foram rompidos na mesma prensa onde foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 24-Corpos de prova em banho maria a 60°C.



Fonte: (AUTOR, 2021)

O dano por umidade induzida é determinado como a razão a resistência à tração por compressão diametral do corpo de prova do subgrupo condicionado e a resistência do subgrupo de controle como mostra a Equação 4:

$$RRT = \frac{RT_C}{RT} * 100\%$$

Onde:

RRT (%): é a razão de resistência à tração retida;

RT_C : é a média da resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova que sofreram condicionamento, em MPa;

RT: é a média da resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova que não sofreram condicionamento, em MPa.

3.2.2.6. Escorrimento do ligante

Para realização do ensaio de escorrimento do ligante esta pesquisa seguiu as recomendações da ASTM D6390, segundo a norma o ensaio deve ocorrer com no mínimo duas amostras de 1200 ± 200 g, não compactadas, que devem ser acomodadas sem perturbação em um cesto com dimensões padronizadas (Figura 25).

Figura 25- Amostra acomodada no cesto para determinação da porcentagem de escorrimento.



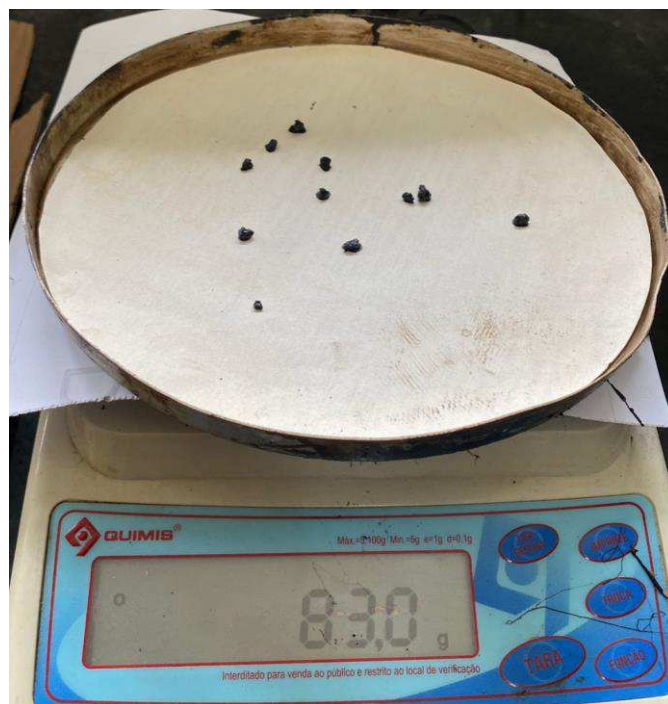
Fonte: (AUTOR, 2021)

Após a acomodação da amostra no cesto a mesma foi colocada sob um prato e levada a estufa durante o período de $1h \pm 5 \text{ min}$ na temperatura de usinagem da mistura.

Segundo a norma o ensaio deve ser realizado além da temperatura de usinagem, à uma segunda temperatura, 10°C acima. No entanto, observando o desenvolvimento do ensaio em outras literaturas, e percebendo-se a prática comum de realização em apenas uma temperatura, optou-se por realizar o ensaio apenas na temperatura de usinagem dado que as condições de mistura no laboratório são controladas.

Decorrido o período de permanência na estufa, o conjunto foi retirado e pesou-se apenas o prato contendo o material resultante do escorrimento do cesto (Figura 26), o mesmo procedimento foi repetido para a segunda amostra.

Figura 26- Material resultante do escorrimento do cesto.



Fonte: (AUTOR, 2021)

A porcentagem de escorrimento é calculada por meio da Equação 5, e não deve ser superior a 0,3% para misturas asfálticas porosas do tipo CPA.

$$\text{Escorrimento (\%)} = \frac{(D - C)}{(B - A)} * 100$$

Onde:

A: Peso do cesto vazio;

- B: Peso do cesto contendo a amostra;
- C: Massa do prato;
- D: Massa do prato contendo o material resultante do escorrimento.

3.2.2.7. Determinação dos vazios comunicantes

Para Oliveira (2003), determinar a porcentagem de vazios comunicantes em misturas, principalmente as com características drenantes, torna-se imprescindível para a análise da eficiência do revestimento quanto a permeabilidade, pois, a partir desta determinação, é possível quantificar o índice de vazios dos poros contínuos que contribui para a percolação da água.

O ensaio para determinação dos vazios comunicantes, seguiu o estabelecido pela Associação das Rodovias do Japão (1996) apud Oliveira (2003), segundo as recomendações da associação deve-se medir com paquímetro a altura e o diâmetro do corpo de prova, em seguida determinar o seu volume, pesa-lo ao ar e submerso em água após um minuto de imersão, o procedimento está demonstrado na Figura 27.

Figura 27- Procedimento de ensaio, vazios comunicantes.



Fonte: (AUTOR, 2021)

A fórmula que determina o índice de vazios comunicantes está descrita na Equação 6.

$$V_{vc}(\%) = \frac{V - C}{V} * 100$$

Onde:

Vvc: % de vazios comunicantes do corpo de prova;

V: Volume do corpo de prova;

C: Volume dos agregados e poros independentes.

C é determinado pela Equação 7:

$$C = \frac{P - P'}{\gamma_{\text{água}}}$$

Onde:

P: Peso do corpo de prova ao ar;

P': Peso do corpo de prova após mergulhá-lo por um minuto;

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa e as análises feitas para cada um. Na primeira etapa foram realizados os ensaios para a determinação do teor ótimo de ligante (determinação do volume de vazios, cântabro e resistência à tração por compressão diametral), bem como as análises que levaram a escolha do teor selecionado. Em seguida, serão apresentados os resultados e discussões dos ensaios de caracterização da mistura no teor ótimo, que são: volume de vazios, cântabro, resistência a compressão diametral, escorrimento, módulo de resiliência, *lottman* e vazios comunicantes. A fim de verificar a viabilidade do uso do CGS na compactação, seguindo os parâmetros definidos pela norma brasileira.

4.1. Determinação do Teor Ótimo de Ligante

Para determinação do teor ótimo de ligante, foram dosadas e compactados no CGS misturas em cinco teores distintos, 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%, a fim de analisar dentre os resultados de volume de vazios, cântabro e RT, a mistura que apresentava melhor desempenho com relação aos limites estabelecidos pela DNIT-ME 386/99.

4.1.1. Determinação do volume de vazios.

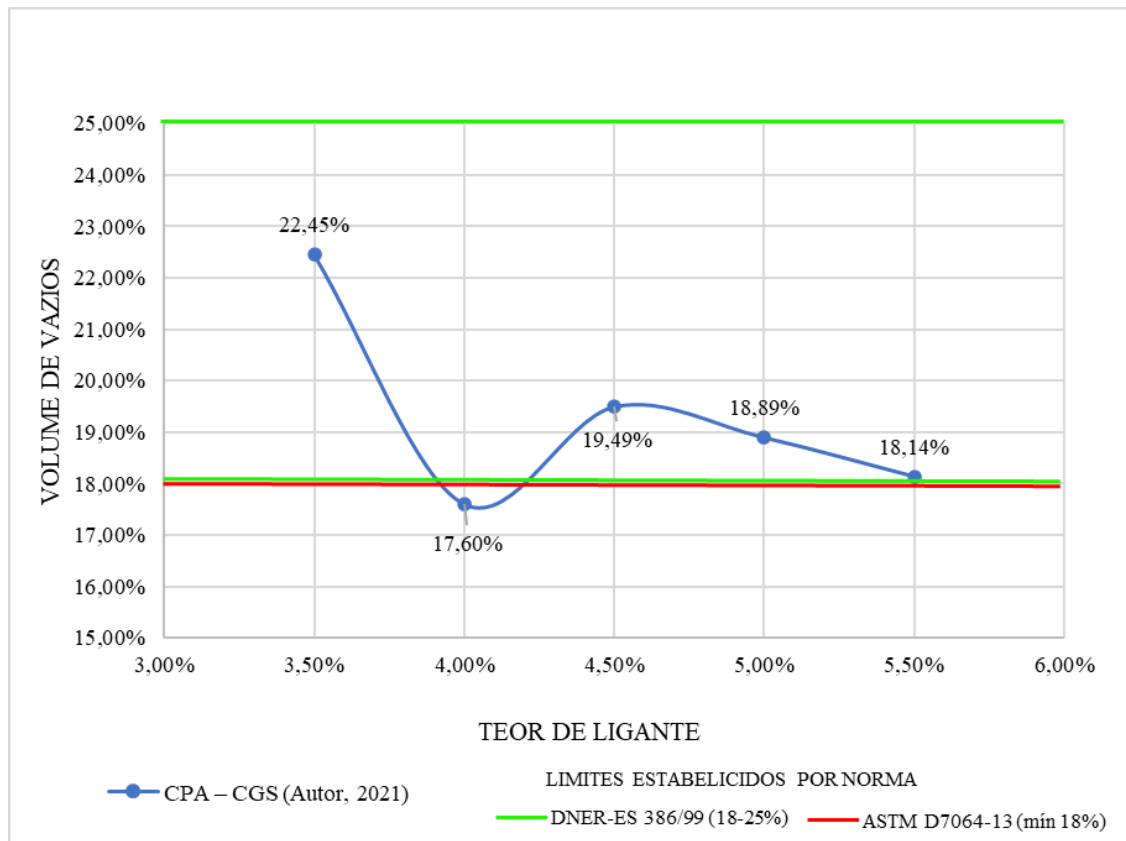
Com base nos resultados obtidos pelos ensaios para a determinação da densidade aparente e da densidade máxima das misturas (Tabela 8), foi possível calcular o volume de vazios das misturas para cada teor de ligante e assim traçar o gráfico volume de vazios *versus* teor de ligantes para a determinação de quais misturas apresentavam-se dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira, DNIT-ME, 386/99.

Tabela 8- Resultados dos ensaios para determinação do volume de vazios.

ENSAIOS	LIMITES	TEOR DE LIGANTE (%)
---------	---------	---------------------

		3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
Densidade aparente (Gmb) (g/cm ³)	-	2,039	2,141	2,074	2,071	2,075
Densidade máxima (Gmm) (g/cm ³)	-	2,629	2,598	2,577	2,554	2,535
Volume de vazios (%)	18-25	22,45	17,60	19,49	18,89	18,14

Figura 28 - Gráfico volume de vazios *versus* teor de ligante.



Fonte: (AUTOR, 2021)

Como pode-se perceber pela Figura 28, com exceção da mistura com teor de 4,0%, que apresentou um valor de Gmb elevado em relação as densidades aparentes das demais misturas (Tabela 8), recomendando-se que esse ensaio seja repetido para esse teor. Todas as misturas CPA compactadas pelo CGS encontraram-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas DNIT-ME 386/99 (18-25%) e ASTM D7064-13 (>18%), entre elas os teores de 3,5% e 4,5% apresentaram-se melhor distribuídos dentro dos limites. Para o teor de 4,5% o autor Schneider (2016) apresentou um volume de vazios de 19,78% próximo ao desta pesquisa.

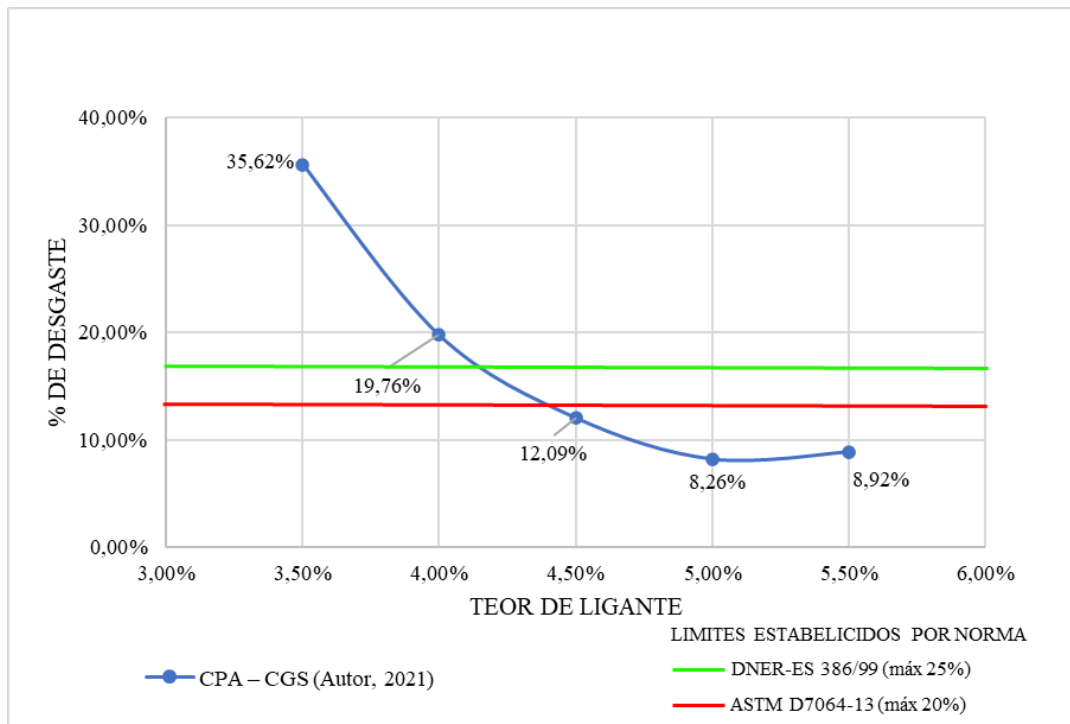
Segundo West e Morre (2006) quando comparadas a compactação CGS, amostras compactadas pelo método Marshall, apresentam maior variabilidade nos resultados. Para

misturas porosas tipo CPA, compactadas por impacto esperasse que os volumes de vazios sejam ligeiramente menores, aos encontrados para misturas com mesma composição granulométrica e mesmo teor de ligante compactadas por amassamento, devido a eventuais fraturas do esqueleto granular da mistura. Essa tendencia ocorre por se tratar de uma mistura que apresenta um maior contato agregado-agregado, na compactação por amassamento esses agregados são acomodados evitando essas fraturas que são mais comuns devido aos impactos da compactação Marshall. Garcia (2017) ressalta ainda que para misturas drenantes compactadas no CGS o volume de vazios tende a estabilizar-se após 100 giros.

4.1.2. Determinação do desgaste por abrasão - Ensaio Cântabro.

Os resultados do ensaio de desgaste cântabro para todos os teores estão apresentados no Figura 29.

Figura 29-Gráfico % de desgaste *versus* teor de ligante.



Fonte: (AUTOR, 2021)

Segundo a especificação 386 do DNIT, o limite máximo de desgaste pelo ensaio de cântabro para uma mistura CPA é de 25% enquanto que para a norma americana o limite aceitável é de 20%. Como podemos perceber na análise da Figura 29, apenas as misturas com

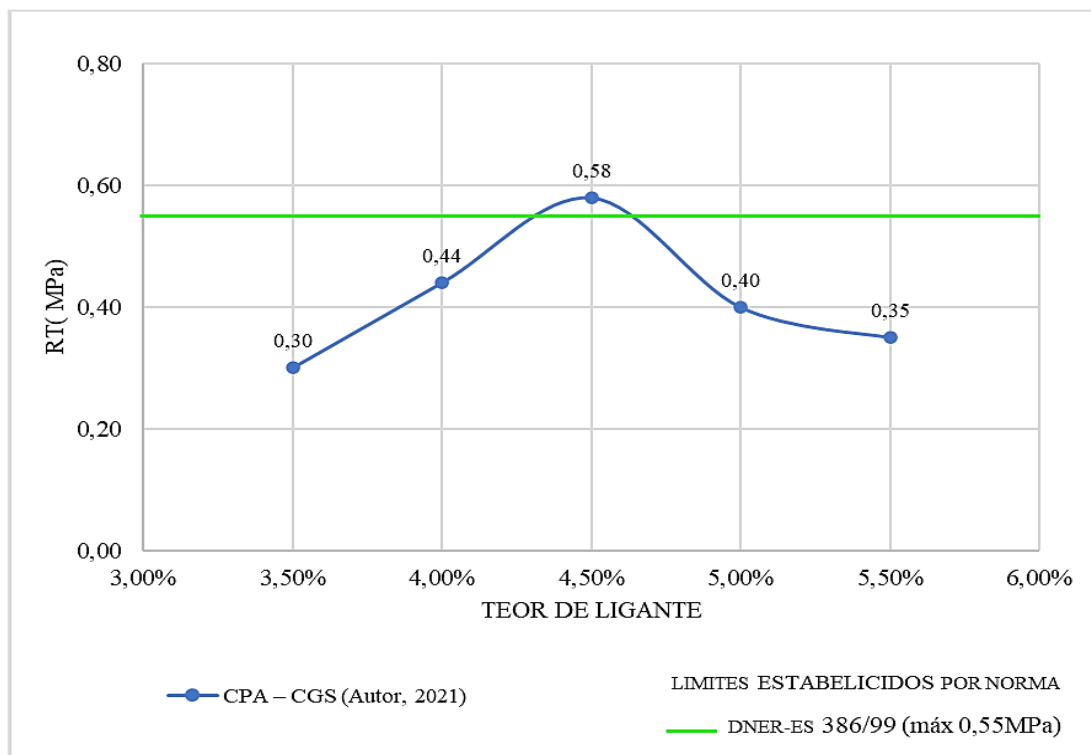
teores inferiores a 3,5% ultrapassaram esses limites, e a mistura com menor porcentagem de desgaste foi a com teor de 5,0% de ligante.

Os resultados obtidos apresentam uma tendência a linearidade, mostrando que quanto maior o teor de ligante, menor tende a ser o desgaste da mistura, fato relacionado propriedade ressaltada por Bernucci et al (2010) do ligante de ser um adesivo termoviscoplastico, por tanto quanto maior o teor de ligante mais adesão terá a mistura e mais resistirá ao desgaste. Meurer Filho (2001) concluiu que para uma determinada granulometria, o teor de ligante asfáltico influi no comportamento das misturas drenantes, o autor comprovou em suas análises que para teores de ligante crescentes as perdas no ensaio Cântabro são decrescentes, comportamento comprovado no ensaio realizado nesta pesquisa.

4.1.3. Resistência à tração indireta por compressão diametral

O gráfico abaixo apresenta as resistências obtidas por meio do ensaio resistência à tração indireta por compressão diametral.

Figura 30- Gráfico da resistência a tração versus teor de ligante.



Fonte: (AUTOR, 2021)

Para análise de qual mistura atendeu aos parâmetros estabelecidos para mistura do tipo CPA, quanto a resistência a compressão, foi levado em consideração o limite estabelecido na DNIT-ME 386/99, tendo em vista que a norma americana não apresenta análises ou limites quanto a resistência à tração indireta por compressão diametral. Como demonstrado na Figura 30, das misturas compactadas com CGS, apenas a mistura com 4,5% de ligante em sua composição atendeu a condição mínima exigida por norma que é 0,55 MPa.

Os resultados encontrados pelo autor Schneider (2016), que aplicou uma compactação Marshall para uma camada porosa de atrito, demonstram valores bem superiores para o ensaio de RT, acima de 0,78 MPa, aos apresentados por esta pesquisa que utilizou o compactador CGS. Entretanto outros fatores além do método de compactação podem estar diretamente relacionados a essa diferença, entre eles a idade dos corpos de prova que se apresentariam mais rígidos ao rompimento, com o passar dos dias e as características dos materiais utilizados para dosagem, principalmente os agregados.

4.1.4. Teor Ótimo de Ligante

Com base nos resultados obtidos pelos ensaios descritos acima, determinou-se que para essa pesquisa, seriam utilizadas misturas com teor de 4,5% de ligante, tendo em vista que esse teor apresentou resultados dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana, nos ensaios de volume de vazios e cântabro e foi o único teor compactado por CGS a ficar acima do limite no ensaio de RT. O teor de 4,5% de ligante foi o mesmo teor determinado por Schneider (2016) em sua pesquisa de dosagem de uma camada CPA seguindo a metodologia convencional brasileira de compactação.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA COM TEOR ÓTIMO

A partir da determinação do teor ótimo de 4,5% de ligante, foram compactados no CGS os corpos de prova para realização da caracterização da mistura, por meio dos ensaios estabelecidos pela norma americana de misturas abertas, como a CPA, ASTM D7064-13. A caracterização buscou verificar se o teor escolhido por meio dos parâmetros brasileiros atende também a norma americana que faz uso na compactação CGS. Os resultados obtidos nos ensaios de volume de vazios, cântabro, resistência a tração a compressão diametral, escorrimento, módulo de resiliência, *lottman* e vazios comunicantes, estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9- Resultado dos ensaios de caracterização da mistura.

ENSAIOS	LIMITES DNIT-ME 386/99	LIMITES ASTM D7064-13	CPA (4,5% DE LIGANTE)
Volume de vazios (%)	18-25	18 (mín)	19,49
Desgaste por abrasão - Cântabro (%)	25 (máx)	20 (máx)	12,09
Resistencia a compressão diametral (MPa)	0,55 (mín)	-	0,58
Escorrimento (%)	0,3 (máx)	0,3 (máx)	0,16
Módulo de resiliência (MPa)	-	-	3071,5
Lottman (%)	80 (mín)	80 (mín)	82,14
Vazios comunicantes (%)	-	-	12,6

Como pode-se perceber, a Tabela 9, mostra que todos os resultados dos ensaios de caracterização da mistura com teor de 4,5% estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas, tanto brasileira, DNIT-ME 386/99, como americana ASTM D7064-13.

Para o ensaio de volume de vazios, a mistura com teor ótimo de ligante apresentou uma porcentagem satisfatória de 19,49%, estando próximo a média do intervalo determinado pela DNIT-ME 386/99, garantindo a capacidade drenante do pavimento. O resultado determinado nesta pesquisa também é próximo ao encontrado na literatura, em Schneider (2016) que dosou a CPA pela metodologia convencional de compactação, o volume de vazios encontrado foi de 19,78% para a mistura com 4,5% de ligante.

No ensaio de desgaste por abrasão – cântabro, o resultado de 12,09% está dentro dos limites de 25% e 20% estabelecido pela especificação de serviço brasileira DNIT-ME 386/99 e americana ASTM D7064-13, respectivamente. Esse valor de desgaste mostra que a mistura CPA com um teor de ligante de 4,5% será resistente ao desgaste por abrasão causado pela fricção gerada entre pneu/pavimento.

O resultado obtido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de 0,58 MPa, apresentou-se dentro do limite mínimo aceitável para misturas do tipo CPA, de 0,55 MPa estabelecido pela DNIT-ME 386/99. No entanto, apesar de não ter função estrutural, que demandaria do revestimento valores de RT elevados, o resultado foi muito próximo desse limite.

Schneider (2016), que apresenta no geral uma proposta de dosagem muito próxima a desta pesquisa, mas com compactação por impacto, obteve um resultado de 0,78MPa, para uma mistura com o mesmo teor de ligante (4,5%) e uma composição granulométrica similar, ensaiadas pela mesma metodologia, determinada pela especificação DNIT ME 136/2018. Em

contrapartida a esta variação, pode-se relacionar, além da compactação por CGS, a questão do tempo de descanso da mistura para realização do rompimento, o esqueleto mineral dos agregados e até mesmo a qualidade do ligante utilizado em ambas as pesquisas.

Porto (1999), define que para aplicação de pavimentos drenantes, como o CPA, recomenda-se que os ligantes asfálticos sejam modificados por polímeros, pois além de apresentarem melhor adesividade, envolvem os agregados com filme de maior espessura, conferindo à mistura maior coesão, reduzindo problemas como a perda por escorrimento, justificando o uso do AMP 55/75-E nessa pesquisa.

O ensaio de escorrimento da mistura comprovou a afirmativa de Porto (1999) ao apresentar uma média de 0,16% para as duas amostras ensaiadas, estando bem abaixo do limite estabelecido pela ASTM D6390 de 0,3%. Desta forma, pode-se constatar que a mistura se apresenta estável quando mantida a temperaturas elevadas, sendo essas temperaturas comparáveis com aquelas usadas durante a produção, estocagem, transporte e espalhamento, isso garante que durante todo esse processo a massa de ligante não terá um alto desprendimento dos agregados, ou seja, as características esperadas em projeto serão conservadas.

Bernucci et al (2010) cita que misturas asfálticas à 25°C, temperatura de realização do ensaio de módulo de resiliência, costumam apresentar valores típicos de MR entre 2.000 a 8.000 MPa. Em específico nada foi encontrado sobre módulo de resiliência para misturas do tipo CPA, então considerando a abordagem de Bernucci et al (2010), pode-se afirmar que a mistura estudada nesta pesquisa apresentou valores esperados para esse ensaio. Para o teor de ligante de 4,5% escolhido nessa pesquisa o valor de MR, 3071,5 MPa foi próximo ao resultado determinado em ensaio por Schneider (2016), de 3415,83MPa para o mesmo teor em uma mistura tipo CPA.

Para o ensaio de dano por umidade induzida - *Lottman*, a mistura asfáltica com teor de ligante de 4,5%, apresentou uma porcentagem de danos de 82,14%, enquadrando-se no limite mínimo de 80%, estabelecido pela AASHTO T283, este limite foi adotado para comparação tendo em vista que a norma brasileira DNIT-ME 180/2018, não apresenta esse dado, mas tem o procedimento de ensaio similar a norma americana AASHTO T283.

No entanto, durante o procedimento de ensaio, o grau de saturação mínimo de 55%, estabelecido pela especificação brasileira não foi atingido, por se tratar de uma camada drenante. Lu, Lou e Harvey (2011), sugerem que esta metodologia de ensaio não é adequada para misturas asfálticas porosas, para os autores a redução da resistência após o condicionamento, pode estar relacionada ao enfraquecimento do ligante e/ou alteração no

esqueleto mineral da mistura devido ao ciclo de congelamento e descongelamento em que são submetidas, visto que as misturas por eles estudadas não apresentaram nenhuma sensibilidade aos efeitos deletérios da água, que causam a perda de adesão entre o ligante asfáltico e os agregados.

Por fim, o ensaio de vazios comunicantes mostrou que a mistura apresenta uma porcentagem de 12,6% de vazios que se interconectam, essa porcentagem é responsável pela percolação de água no interior da camada de atrito porosa.

Por meio da quantificação dos vazios comunicantes da mistura com 4,5% de ligante foi possível também verificar a porcentagem de vazios ineficazes da mistura, resultado da diferença entre o volume de vazios e os vazios comunicantes, para essa pesquisa a porcentagem de vazios ineficazes é de 6,89%, esses vazios são responsáveis pelo armazenamento de água no interior CPA.

5. CONCLUSÕES

A realização deste estudo objetivou analisar a viabilidade do uso do compactador giratório SUPERPAVE® (CGS) na dosagem das camadas porosas de atrito, tomando como base os parâmetros estabelecidos pela norma DNIT-ME 386/99. Para alcançar este objetivo foi observado o comportamento dos parâmetros volumétricos, hidráulicos e mecânicos de uma mistura asfáltica dosada a partir da análise dos resultados dos ensaios de volume de vazios, desgaste cântabro e RT em cinco teores distintos, segundo os parâmetros da DNIT-ME 386/99.

Partindo-se dos resultados obtidos e da análise desses, chegou-se às seguintes considerações para uma camada porosa de atrito dosada teor de ligante de 4,5% e compactada com auxílio do CGS:

- A porcentagem de volume de vazios para amostras compactadas por CGS apresentam valores satisfatórios e dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana. Portanto podemos afirmar que método de compactação em estudo preserva a característica drenante da CPA.
- As misturas compactadas pelo CGS que apresentam maior uniformidade e coesão da mistura, apresentando-se pouco susceptíveis ao desgaste por abrasão.
- Quanto a resistência à tração por compressão diametral, mesmo não sendo uma camada com função estrutural, a mistura compactada pelo CGS apresentou resultado superior ao limite estabelecido pelo DNIT-ME 386/99.
- O índice de escorrimento da mistura foi satisfatório, resultado da melhor adesão do

ligante modificado por polímero.

- O módulo de resiliência encontrado está dentro do esperado para misturas asfálticas segundo a literatura.
- O índice de dano por umidade também está acima no solicitado por norma, no entanto para Lu, Lou e Harvey (2011) esse dano encontrado pode ser decorrente do enfraquecimento do ligante e/ou alteração no esqueleto mineral da mistura devido a ação de congelamento e descongelamento, e não por efeitos deletérios da água.
- O ensaio de vazios comunicantes comprovou que a maioria dos vazios presentes na mistura estudada são interconectados permitindo a percolação de água no interior da CPA, assim mesmo com a compactação por CGS a característica drenante da mistura é preservada.

Com base nas considerações feitas, pode-se concluir que o objetivo principal dessa pesquisa foi alcançado, sendo possível a aplicação da compactação SUPERPAVE, em uma mistura CPA dosada a partir dos parâmetros estabelecidos pela especificação brasileira DNIT-ME 386/99, sem prejuízos as características volumétricas, mecânicas e hidráulicas da mistura.

Ao constatar a viabilidade de se realizar a compactação por amassamento em camadas porosas de atrito, dosadas a partir dos parâmetros da norma brasileira DNIT-ME 386/99, garante-se aos estudos acadêmicos uma compactação mais próxima à realizada em campo, sem deixar de levar em consideração a realidade brasileira, o que ocorre quando adota-se apenas os parâmetros da norma americana ASTM D7064-13. Desta forma, conclui-se que os resultados encontrados nesta pesquisa corroboram para mais um passo na evolução da utilização de mistura do tipo CPA no Brasil.

A fim de sanar algumas lacunas deste estudo, propõem-se a realização de pesquisas futuras para comparação de dados advindos de mesmos materiais e mesma curva granulométrica, porém, com compactações realizadas tanto por amassamento, como por impacto. Assim, pode-se avaliar mais fielmente os reais impactos da mudança do tipo de compactação na dosagem da CPA, segundo os parâmetros da DNIT-ME 386/99.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283: Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage**. Anexo de normas traduzidas – Rede Temática de Ligante asfáltico – PETROBRÁS, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**, EUA, 2004.

_____. **Standard practice for open-graded friction course (OGFC): D7064**. West Conshohocken, PA, 2013.

_____. **Standard test method for determination of draindown characteristics: D6390**. West Conshohocken, 2011.

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

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

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BERNUCCI, L. L. B.; et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2010.

CARARO, Fernanda Zanatta; STEINER, Luiz Renato; CARPIO, Joe Arnaldo Villena del. **Influência Da Granulometria Na Permeabilidade De Misturas Asfálticas CPA**. 2016. 20 f. Artigo (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma-Sc, 2016. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/5129/1/FernandaZanattaCararo.pdf>. Acesso em: 01 set. 2021.

CNT, Conselho Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>. Acesso em: 23. abr. 2021. p.73-74. 238 p.

DEL CARPIO, J. A. V. **Uso de Pigmentos de Óxidos de Metais Mistos na Pavimentação para a Mitigação da Ilha de Calor Urbana**. 2014. 437 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil – Ppgec da

Universidade Federal de Santa Catarina., Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - ME 386/99. **Pavimentação: pré-misturado a quente com asfalto polímero: camada porosa de atrito.** Rio de Janeiro, 1999.

_____. DNIT-ME **043/95: misturas betuminosas a quente: ensaio Marshall.** Rio de Janeiro, 1995.

_____. DNIT-ME **054/97: Equivalente de areia.** Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNIT-ME **083/98: Agregados: análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNIT-ME **383/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro.** Rio de Janeiro, 1999.

_____. DNIT-ME 136: **Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. DNIT– ME **131/2010– Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola.** Rio de Janeiro. 2010a.

_____. DNIT – ME **155/2010– Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2010d.

_____. DNIT-ME **-Manual de projeto e práticas operacionais para segurança nas rodovias.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT-ME **413/19: Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas –Método de ensaio.** Brasília, 2019.

_____. DNIT-ME **411/19: Pavimentação - Misturas asfálticas – Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio.** Brasília, 2021.

DRESCH, Fernanda. **COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA).** 2016. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2016.

GUIMARÃES, J. M. F.; et al. **Desagregação e permeabilidade de concretos asfálticos drenantes com ligantes modificados**. IAG279-01-2013. Programación de Trabajos Técnicos XVII Cila 2013, Casa Santo Domingo, Antigua Guatemala, Lunes, 18 de noviembre de 2013.

Harman, T., Bukowski, J. R., Moutier, F., Huber, G. e MCG Sennis, R. (2002). History and Future Challenges of Gyrotory Compaction - 1939 to 2001. Transportation Research Record 1789.

KNABBEN, R.M. **Desenvolvimento Do Trailer-Cpx e de uma Mistura Asfáltica de Baixa Emissão de Ruído Pneu-Pavimento**. Tese de Doutorado. Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil – PPGEC. Florianópolis, 2017.

LU, Qing; LUO, Sang; HARVEY, John. Compaction of Noise-Reducing Asphalt Mixes in the Laboratory. **Road Pavement And Material Characterization, Modeling, And Maintenance**, [s.l.], p.1-9, 16 maio 2011. American Society of Civil Engineers.

MEDINA, J. DE; MOTTA, L. M. G. DA. **Mecânica dos pavimentos**. 3ª Ed., Rio de Janeiro. Interciência, 2015.

MEURER FILHO, E. **Estudos de granulometria para concretos asfálticos drenantes**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC: UFSC, 2001.

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. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo. 1998.

OLIVEIRA, C.G.M. **Estudo de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante**, 2003.87 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2003.

OLIVEIRA, Carlos Gustavo Macedo. **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1991.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Synergia, 2010.

REBOUÇAS, E.S., **Comportamento de misturas asfálticas do estado de Roraima fabricados com basaltos e diferentes tipos de filler**, UFRR, Boa vista/Roraima, 2011.

ROSENO, J. L. **Avaliação de uma mistura asfáltica porosa com agregados calcários e asfalto-borracha**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

SCHNEIDER, Daniel. **Determinação Do Teor De Asfalto Para Enquadramento De Uma Mistura Asfáltica Aberta Como Camada Porosa De Atrito**. 2016. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2016.

SOARES, Jessica Santiago. **Investigação da relação entre parâmetros da compactação giratória e de deformação permanente em misturas asfálticas densas**. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde15122014163104/publico/jessicasoares.pdf>. Acesso em: 26 maio 2021

WATSON, D.; et al. **Laboratory performance testing of open-graded friction course mixtures**. Transportation Research Record 1891, Transportation Research Board, Washington, DC, 40–47, 2004.

WEST R.C.; MOORE J.R. **Evaluating Georgia's compaction requirements for Stone Matrix Asphalt Mixtures**. Final Report. The Georgia Department of Transportation – DOT. Georgia, 2006.