

Faculdade de Tecnologia de São Paulo  
Departamento de Transportes e Obras de Terra

SUSI TORRES

Dosagem Marshall de uma mistura asfáltica tipo CPA com  
ênfase a permeabilidade

SÃO PAULO  
2018

SUSI TORRES

Dosagem Marshall de uma mistura asfáltica tipo CPA com  
ênfase a permeabilidade

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Tecnólogo em Construção Civil na Modalidade de Movimento de Terra e Pavimentação.

Orientador: Prof. Doutor Edson de Moura

SÃO PAULO  
2018

## DEDICATÓRIA

Dedico este Trabalho de Graduação,  
bem como todas as demais conquistas da  
minha vida, aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Doutor Edson de Moura por toda a dedicação e satisfação ao transmitir todo o seu conhecimento por todos esses anos na FATEC São Paulo e pela disponibilidade e paciência de me orientar e coordenar a realização desse Trabalho de Graduação, acredite foi uma experiência excepcional ser sua aluna e orientanda muito obrigada.

A Faculdade de Tecnologia de São Paulo e aos docentes do curso de Movimento de Terra e pavimentação vocês me fizeram crescer profissionalmente e intelectualmente em especial ao auxiliar docente Rafael Godoy pela ajuda e empenho para a realização dos ensaios no Laboratório de solos você teve grande importância para a realização desse TG muito obrigada.

Ao Diretor da FATEC São Paulo Décio Moreira por toda a persistência e luta de fazer com que os tecnólogos fossem reconhecidos.

Aos meus pais Marinaldo Rodrigues e Maria das Dores, a quem dedico esse Trabalho, que nunca desistiram e sempre me incentivaram a ser um Ser Humano melhor, e graças a vocês me tornei uma mulher íntegra e ética, devo tudo a vocês.

Ao meu Irmão Getúlio Torres, acredite você me ensinou muito e tem grande importância na minha vida.

Ao meu Namorado Diogo Custódio, você sempre me incentiva com muito amor a ser uma profissional competente e uma pessoa melhor, te agradeço por toda a paciência e finais de semana se dedicando ao meu Trabalho Acadêmico, acredito que agora você entenda toda a minha ausência no decorrer dessa graduação e te agradeço por todo o apoio você é muito especial pra mim te amo.

Aos Grandes amigos Cibele Gomes, Juliana Bittencourt e Bruno Dias vocês fizeram com que a faculdade se tornasse uma experiência única, extremamente divertida e feliz levarei pra sempre tudo que aprendi com vocês e sentirei saudades das nossas risadas, vocês são demais. Graças a vocês cresci muito como pessoa.

Aos amigos Ariel Xavier, Flavia Renata e Aline Lisboa agradeço pela amizade e pelas conversas vocês me ajudaram muito no decorrer da Faculdade e foi excepcional conhecer vocês.

As amigas Lanna Costa e Jhenifer Caroline, vocês me conhecem a muitos anos e tiveram grande importância na minha formação pessoal, mesmo que indiretamente me ajudaram a chegar no final dessa graduação sempre me apoiaram em todas as minhas decisões sou muito grata a vocês.

A Deus acima de tudo e todos.

## EPÍGRAFE

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.” (Albert Einstein)

## **RESUMO**

Esse trabalho de graduação (TG) tem por finalidade apresentar uma dosagem Marshall de uma mistura asfáltica tipo CPA, atendendo a faixa I da especificação DNER 386/99 e com uso de ligante asfáltico modificado por polímero SBS 60/85E. A pesquisa além de testar a mistura asfáltica face às especificações da norma, verificou a permeabilidade da mistura asfáltica com permeâmetro de carga constante. O resultado obtido de perda no ensaio cântabro não foi satisfatório. Provavelmente, essa não conformidade esteja associada a forma do agregado graúdo e/ou a pequena espessura de filme de ligante asfáltico que envolveu os agregados. Quanto ao parâmetro Ks de permeabilidade apresentou valores similares aos encontrados na literatura para esse tipo de mistura.

Palavras-chave: CPA, camada drenante, pavimento drenante.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Malha Rodoviária Brasileira.....	12
Figura 1.2 - Aquaplanagem .....	13
Figura 2.1 – Vias Romanas .....	18
Figura 3.1 – Exemplos de corpos-de-prova de diversas formas e compactadores de misturas asfálticas.....	20
Figura 3.1.1 – Faixas granulométricas especificação DNER 386/99 .....	22
Figura 3.1.2 - Composição dos Agregados .....	23
Figura 3.1.2 - Composição Granulométrica e faixa I da especificação DNER 386/99 .....	23
Figura 3.2.1 - Brita ½” .....	24
Figura 3.2.2 - Pedrisco .....	24
Figura 3.2.3 - Pó de pedra .....	24
Figura 3.2.4 - Cal CH-I .....	24
Figura 3.2.5 – Bandejas dos corpos de prova já pesados .....	24
Figura 3.2.6 – Bandejas dos corpos de prova colocados em estufa 170°C .....	25
Figura 3.2.7 – Aquecimento do ligante asfáltico com emprego de fogareiro .....	26
Figura 3.2.8 – Adição do ligante asfáltico ao agregados .....	27
Figura 3.2.9 - Homogeneização da mistura.....	27
Figura 3.2.10 - Compactador de Marshall Mecânico .....	28
Figura 3.2.11 - Amostras Compactadas .....	28
Figura 3.2.12 - Detalhe da superfície da amostra compactada.....	29
Figura 3.2.13 – Corpos de prova desformados .....	29
Figura 3.2.14 - Dimensões dos corpos de prova.....	30
Figura 3.2.15 - Volume de vazios em função do teor de ligante asfáltico .....	31
Figura 3.3.1.1 - Corpo de prova envelopado com fita crepe .....	31
Figura 3.3.1.2 - Corpo de prova envelopado com fita crepe sendo acondicionado no tubo de PVC.....	31
Figura 3.3.1.3 – Preenchimento do vão entre o corpo de prova a lateral do tubo de PVC .....	32
Figura 3.3.1.4 – Tubo prolongador com saída reguladora de altura.....	32
Figura 3.3.1.5 – Conjunto montado sobre uma bandeja com pedrisco.....	32
Figura 3.3.1.6 – Determinação da carga hidráulica .....	33
Figura 3.3.1.7 – Determinação da altura entre a borda superior do tubo de PVC e a lâmina d’água da bandeja .....	33
Figura 3.3.1.8 – Determinação da vazão.....	34
Figura 3.3.1.9 - Coeficiente de Permeabilidade x Porcentagem de Ligante .....	37
Figura 3.4.1 Ensaio de Compressão Diametral de corpo de prova cilíndrico .....	37
Figura 3.4.2 – Prensa de compressão diametral .....	38
Figura 3.4.3 – Resistência à tração por compressão diametral x Porcentagem de Ligante.....	39
Figura 3.5.2.1 – Detalhe do corpo de prova n.2 após ensaio cântabro .....	40
Figura 3.5.2.2 – Detalhe do corpo de prova n.3 após ensaio cântabro .....	40
Figura 3.5.2.3 – Detalhe do corpo de prova n.6 após ensaio cântabro .....	41
Figura 3.5.2.4 – Detalhe do corpo de prova n.8 após ensaio cântabro .....	41
Figura 3.5.2.5 – Detalhe do corpo de prova n.10 após ensaio cântabro .....	41
Figura 3.5.2.6 - Perda de Massa no Ensaio Cântabro x Porcentagem de Ligante .....	42
Figura Gráfico Volume de Vazios .....	50
Figura Gráfico Densidade Máxima Teórica .....	50



## LISTA DE TABELA

Tabela 3.2.1 – Composição e massa dos corpos de prova tipo Marshall.....	24
Tabela 3.2.2 - Massas de ligante asfáltico para cada teor .....	26
Tabela 3.5: Parâmetros de dimensões, massas específicas aparente e máxima medida e volume de vazios .....	30
Tabela 3.3.1.1 – Carga hidráulica de cada corpo de prova ensaiado .....	33
Tabela 3.3.1.2 – Vazão média do corpo de prova 1.....	34
Tabela 3.3.1.3 – Vazão média do corpo de prova 2.....	34
Tabela 3.3.1.4 – Vazão média do corpo de prova 3.....	35
Tabela 3.3.1.5 – Vazão média do corpo de prova 4.....	35
Tabela 3.3.1.6 – Vazão média do corpo de prova 5.....	35
Tabela 3.3.1.7 – Vazão média do corpo de prova 6.....	35
Tabela 3.3.1.8 – Vazão média do corpo de prova 7.....	35
Tabela 3.3.1.9 – Vazão média do corpo de prova 8.....	35
Tabela 3.3.1.10 – Vazão média do corpo de prova 9.....	35
Tabela 3.3.1.11 – Vazão média do corpo de prova 10.....	35
Tabela 3.3.1.12 Coeficientes de permeabilidade (Ks) .....	36
Tabela 3.4.1: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	38
Tabela 3.5.2.1 – Resultado do ensaio de cântabro.....	41
Tabela Dados dos CPs.....	49
Tabela Dados do Ensaio de Permeabilidade .....	49
Tabela Densidade Aparente e Volume de Vazios .....	49

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

A.C. – Antes de Cristo

CH – I - Cal Hidratada

CP – Corpo de Prova

CPA – Camada Porosa de Atrito

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

K – Coeficiente de Permeabilidade

MEMM – Massa Específica Máxima Medida

NBR - Norma Brasileira

PVC – Policloreto de Polivinila

SBS – Estireno-butadienoestireno

SHRP - Strategic Highway Research Program

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo.....</b>	<b>15</b>
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	15
1.1.3	<i>Justificativa .....</i>	15
1.1.4	<i>Metodologia.....</i>	16
<b>2</b>	<b>CONTEXTO HISTÓRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1	Composição Granulométrica.....	22
3.2	Preparo dos Corpos de Prova.....	23
3.3	Parâmetros Marshall .....	29
3.4	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	37
3.5	Resistência ao Ensaio de Cântabro.....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E COMENTÁRIOS .....</b>	<b>43</b>
4.1	Volume de Vazios.....	43
4.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	43
4.3	Resistência ao ensaio cântabro .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES .....</b>	<b>46</b>
	<b>APENDICE A – Tabelas.....</b>	<b>51</b>
	<b>APENDICE B – Gráficos.....</b>	<b>52</b>

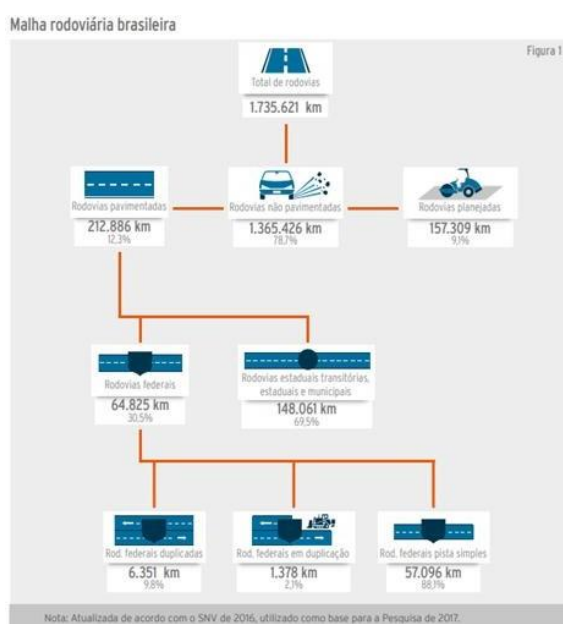
## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o crescimento populacional no Brasil tem sido amplo, segundo dados estima-se que o Brasil tem atualmente cerca de 207,7 milhões de habitantes e uma taxa de crescimento populacional de 0,77% registrada entre 2016 e 2017 (IBGE 2017). Com esse crescimento, surge a necessidade de maiores investimentos pelo poder público em infraestrutura em todos os segmentos da sociedade. Tem-se registrados nas últimas décadas falhas nos planejamentos e também ausência desses na concepção de obras em geral. Não diferentemente, em obras viárias tem se observado grandes falhas.

Os reflexos desse mal planejamento do poder público estão espelhados na qualidade dos pavimentos, tanto de rodovias como também nas vias das grandes capitais do nosso país, com presença acentuada na qualidade dos pavimentos como: buracos, deformação permanente em trilha de roda trincas por fadiga e muitos problemas oriundos da má, ou mesmo ausência de drenagem.

Apesar de o Brasil ser um país que por muitos anos foi engajado no desenvolvimento da nossa malha rodoviária o mau planejamento tem interferido nesse processo e conforme pesquisas da Confederação Nacional de Transportes, menos de 13% das rodovias brasileiras são pavimentadas e cerca de 61,8% apresentam algum tipo de deficiência. (IBGE 2017)

Figura 1.1 - Malha Rodoviária Brasileira



Fonte: [www.http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br)

O transporte Rodoviário tem suma importância no desenvolvimento socioeconômico, ressaltando que através dele há uma movimentação de cargas e pessoas, pois outros tipos de malhas de transporte não possuem o mesmo espaço no nosso território.

A falta ou má drenagem associado à péssima qualidade de nossas vias tem-se o aumento de acidentes colocando a vida dos usuários em risco. Um dos fatores causadores de acidentes em rodovias é a aquaplanagem (Figura 1.2), ou seja, a presença demasiada de um filme de água na superfície do pavimento dificultando a interação entre o pneu e o pavimento, diminuindo, consideravelmente, o atrito.

O adequado controle das águas que infiltram na estrutura do pavimento é considerado fundamental para o bom desempenho deste, sendo a drenagem subsuperficial a principal responsável por este controle. (MOUTON,1990).

Figura 1.2 - Aquaplanagem



Fonte: <http://www.transvias.com.br/7315/noticias/Dica:-Entenda-sobre-a-Aquaplanagem-e-saiba-como-evitar>

Segundo é apresentada na dissertação de mestrado, a água captada pelo pavimento pode ser conduzida para um reservatório, e deste para um ponto de saída ou captação, ou simplesmente ser absorvida pelo solo. A sub base e base dos pavimentos permeáveis, construídas por agregados de granulometria aberta e com poucas partículas finas, atuam como um recipiente de coleta d'água deixando que o líquido permaneça nos vazios das camadas. O correto dimensionamento da espessura das camadas, levando-se em consideração as premissas de volume de tráfego, tipo de carregamento, número de solicitações e outros fatores mecânicos, associados às premissas hidráulicas de tempo de armazenamento, tempo de retenção e condutividade hidráulica, permitem a execução de um pavimento permeável que

atenda simultaneamente aos anseios da Engenharia de Transportes, da Engenharia Hidráulica e da sustentabilidade. (VIRGILIIS, 2009, p. 2).

Duas formas usuais podem ser aplicadas de forma a minimizar o efeito causador da diminuição do atrito pneu/pavimento: (i) emprego de misturas asfálticas mais rugosas, para tanto, tem-se utilizado distribuição granulométrica compostas com porcentagens maiores de materiais de maior dimensão ou (ii) emprego de mistura asfáltica tipo CPA – camada porosa de atrito. A grande vantagem dessa última é que mesmo durante chuvas torrenciais a superfície do pavimento permanece sem a formação de filme d', mantendo o contato pneu/pavimento e a não formação da bruma (*spray*) o que também dificulta a visibilidade do motorista. Temos também a diminuição do ruído gerado pela ação do pneu.

Concreto asfáltico poroso com ligante asfáltico modificado por polímero é uma mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas. É composto de agregado graduado, cimento asfáltico modificado por polímero e, se necessário, material de enchimento, fíler, e melhorador de adesividade, sendo espalhada e compactada a quente. O concreto asfáltico poroso com ligante modificado por polímero deve ser empregado como camada sobrejacente ao revestimento, com a função de drenar a água superficial evitando a aquaplanagem, recebe a denominação de camada porosa de atrito. (CONCRETO ASFÁLTICO POROSO COM LIGANTE MODIFICADO POR POLÍMERO - CAMADA POROSA DE ATRITO, DER (2006), p. 4).

A qualidade da mistura asfáltica tipo CPA está na escolha adequada dos materiais constituintes, principalmente, no que tange a forma dos agregados, que deve ser inferior a 0,5 conforme norma DNER 386:2009 – Pavimentação – Pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Esse trabalho apresenta a dosagem Marshall de uma mistura asfáltica tipo CPA, com emprego de ligante asfáltico modificado por polímero, atendendo o que preconiza a norma DNIT 386:2009, entretanto, foi utilizado agregado com índice de forma fora da especificação. Um dos fatores prejudicados com emprego de agregados fora de especificação quanto à forma é diminuição da permeabilidade e a alteração do intertravamento granular, características fundamentais para esse tipo de mistura. O teor de projeto foi eleito com base no ensaio de adesividade cântabro, volume de vazios, resistência à tração por compressão diametral e o coeficiente de permeabilidade.

## 1.1 Objetivo

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho de graduação é apresentar uma dosagem Marshall de uma mistura asfáltica tipo CPA, com base na especificação do DNER 386:2009 com emprego de agregados fora de especificação quanto à forma determinada em norma.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Pesquisar na literatura existente os métodos e procedimentos de dimensionamento estrutural da Camada Porosa de Atrito;
- Realizar ensaios de Resistência a Tração por Compressão Diametral, Ensaio de adesividade Cântabro, Ensaio de Permeabilidade, Volume de Vazios;
- Confrontar se os valores apresentados conseguidos através dos métodos de ensaios atendem as condições do DNER 386:2009.

### 1.1.3 Justificativa

Os benefícios da mistura asfáltica tipo CPA são:

- (i) Mistura asfáltica com distribuição granulométrica e teor de ligante asfáltico que resulte em um volume de vazios superior a 20%;
- (ii) Capacidade de drenagem sub-superficial - fluxo horizontal da água. Águas pluviais penetram na camada e ocorre o fluxo da água dentro da camada de CPA;
- (iii) Devido a ausência de filme de água na superfície de rolamento, não ocorre a formação da bruma (*spray*) o que dificulta a visibilidade do motorista;
- (iv) Diminuição do ruído pneu/pavimento – devido à porcentagem de vazios permitem que estejam interconectadas e também ao tamanho desses vazios, as ondas sonoras geradas pela interação pneu/pavimento penetram nesses vazios e perdem potência, diminuindo a intensidade sonora.

A grande desvantagem desse tipo de mistura é a durabilidade. Por se tratar de uma mistura asfáltica com baixa superfície específica (comparativamente a um concreto asfáltico)

tem-se teor de ligante asfáltico menor, o que propicia a pequena espessura do filme de ligante que envolve o agregado. Essa pequena espessura de ligante, somada ao fluxo de ar e de água que o CPA permite devido aos poros, acaba por acelerar a oxidação do ligante asfáltico diminuindo a vida útil da mistura.

Como mencionado acima, uma das grandes vantagens é a permeabilidade que esse tipo de mistura propicia. Esse parâmetro está intimamente relacionado com a forma do agregado utilizado, partículas não cúbicas podem diminuir consideravelmente a permeabilidade, mesmo em CPA com volume de vazios dentro dos limites especificados.

Assim, essa pesquisa avaliou a permeabilidade de uma mistura tipo CPA, enquadrada entre a faixa IV e V do DNER conforme preconiza DNER 386:2009, com emprego de agregados fora da especificação quanto a forma.

#### ***1.1.4 Metodologia***

Este trabalho de graduação foi elaborado com base em levantamento de dados com a realização de ensaios para aferirmos a qualidade da drenagem do CPA. Os corpos de prova utilizados foram moldados segundo as determinações do método Marshall.

Atendida todas as normas que preconizam a dosagem de misturas asfálticas tipo CPA, recomendadas pelo DNER 386:2009, foi adicionado o ensaio de permeabilidade de carga constante.

O ensaio de permeabilidade foi executado nos corpos de prova tipo Marshall, em todos os teores. Inicialmente, os corpos de prova foram saturados em seguida com uma carga hidráulica na ordem média de 18 cm, submeteu-se a um fluxo medindo-se a vazão.

As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, podendo verificar com maior propriedade a resistência do material.

O ensaio de Cântabro foi realizado no laboratório da Universidade Politécnica de São Paulo a fim de termos parâmetros quanto ao desgaste dos corpos-de-prova de misturas betuminosas.

O volume de vazios foi aferido após levantamento da densidade máxima aparente e devem apresentar parâmetros recomendados pelo DNER 386:2009, que devem apresentar valores entre 18% e 25%.



## 2. CONTEXTO HISTÓRICO

O Contexto Histórico foi extraído do livro “Pavimentação Asfáltica Formação Básica para Engenheiros” de 2008.

No Brasil, Bittencourt (1958) apresenta um memorável apanhado dessa história desde os primeiros povos organizados até o início do século XX. Destaca-se também o esforço de Prego (2001) de concluir a ação iniciada em 1994 pela Associação Brasileira de Pavimentação, por meio de sua Comissão para Elaborar a Memória da Pavimentação, que nomeou inicialmente o engenheiro Murillo Lopes de Souza para escrever sobre o tema.

Percorrer a história da pavimentação nos remete à própria história da humanidade, passando pelo povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento. Como os pavimentos, a história também é construída em camadas e, freqüentemente, as estradas formam um caminho para examinar o passado, daí serem uma das primeiras buscas dos arqueólogos nas explorações de civilizações antigas

A Pavimentação tem início por volta de quatro mil e seiscentos A.C., no início, foi desenvolvida não para a locomoção de pessoas, mas para fins religiosos, abriam-se vias para o transporte de materiais para as construções de templos e pirâmides. A via pavimentada mais antiga que se tem conhecimento é a Faiyumhollow, ao sul do Cairo no Egito e ligava uma pequena pedreira de basalto a um aqueduto que se desbocava no Nilo, tem-se a estimativa que tinha em média treze quilômetros de extensão. As vias eram construídas com lajões justapostos em base e possui uma boa capacidade de suporte, conseguia-se amenizar o atrito com o umedecimento com água, azeite e musgo molhado.

O Império Grego foi responsável por difundir a pavimentação na antiguidade, com idolatrias religiosas eles preservavam as vias que eram utilizadas para o transporte de imagens, estatuas e figuras religiosas e anos mais tarde o império Romano com um robusto sistema técnico e de manutenção foram responsáveis por reter as melhores técnicas de pavimentação da Antiguidade. A título de exemplo é apresentado na (Figuras 2.1) a Vias Romanas em Roma, ainda com a configuração original.

Figura 2.1 – Vias Romanas



Fonte: Pavimentação Asfáltica Formação Básica para Engenheiros, 2008, p.14

Na Europa os pavimentos já estavam difundidos por todo o continente no século XVIII, e em mil setecentos e noventa Mascarenhas Neto apresenta um Tratado para a Construção de Estradas, em uma poderosa referência para o meio rodoviário e na época já havia uma intensa necessidade de estudos e preocupações que se levam em conta para uma pavimentação de qualidade, como a drenagem, erosão e distância de transporte.

O Império Inca realizou as primeiras pavimentações na América por volta de mil e quatrocentos D.C e anos mais tarde por volta do ano de mil e oitocentos, o alemão Alexander Von Humboldt qualificou as estradas Incas como “os mais úteis e estupendos trabalhos realizados pelo homem”. (Von Humboldt, 1804)

No Brasil relatos históricos revelam que a primeira via pavimentada teve surgimento no ano de mil quinhentos e sessenta e foi executada com pedras importadas de Portugal e até o início do século XX esse era o método construtivo utilizado, só a partir desse momento que começaram a utilizar pavimentos asfálticos que foram evoluindo com os anos e estão em utilidade até o momento atual.

Os construtores de estradas de antigamente sabiam que a água é o maior inimigo do pavimento.

As estradas nunca poderão ser seguramente construídas, até que os seguintes princípios sejam completamente entendidos, admitidos e utilizados: é o solo natural que realmente suporta o peso do tráfego; enquanto este solo puder ser mantido seco, poderá suportar qualquer peso sem deformações importantes... se passar água através da estrada e saturar o solo natural, esta, qualquer que seja sua espessura perderá sua capacidade de suporte e se despedaçará...

A opinião errônea, e tão tenazmente arraigada, de que a colocação de uma grande quantidade de pedras sob as estradas remediará as grandes deformações na argila muito úmida ou outros solos moles, ou, em outras palavras, que as estradas poderão ser tornadas suficientemente resistentes, artificialmente, para suportar pesadas carruagens enquanto o subleito estiver com elevada umidade e, por estes meios, evitar a inconveniência do solo natural que recebe a água das chuvas ou de outras fontes, produziu a maioria dos defeitos das estradas na Grã-Bretanha. (MCADAM, 1820)

A declaração de McAdam apresenta a relação da época com pavimentos bem drenados, devem-se levar em consideração que os veículos que passavam pelas vias eram carruagens com rodas mais estreitas e mais rígidas, outro fato a ser levado em consideração é que nos pavimentos da época existiam uma camada superficial e as demais camadas eram constituídas de solo ou solo com agregado.

[...]as precipitações pluviais representam a maior fonte de água que penetram na estrutura dos pavimentos, podendo ocasionar infiltrações tanto pela superfície quanto pelos bordos da estrutura do pavimento. O Excesso de água, com o passar do tempo, tem influência negativa sobre a serventia, embora os danos causados pela infiltração de água no pavimento não se manifestem instantaneamente. O processo de deterioração da estrutura e da consequente redução da vida útil de serventia do pavimento é gradual, podendo passar despercebido durante muito tempo. As principais evidências da presença de água no pavimento poderão ser resíduos secos, apresentando-se como manchas de coloração variegada junto às trincas e juntas, e sobre os acostamentos, além do desnivelamento das juntas e trincas. (Moulton, 1980).

## **2.1 Definição de Pavimento**

O Prof. Doutor Edson de Moura define pavimento de uma forma mais ampla como uma estrutura constituída de diversas camadas de diversos materiais num espaço semi-infino construída para resistir as solicitações das cargas repetidas e itinerantes e ações do ambiente no horizonte temporal de projeto.(MOURA, 2018)

## **2.2 Misturas Asfálticas a Quente**

A dosagem de misturas asfálticas tem sido alvo de pesquisas experimentais com o intuito de achar um teor de ligante ótimo de projeto, para uma dada faixa granulométrica pré-definida, a escolha de um teor dito como ótimo não é uma tarefa simples de ser definido acredita-se que esse termo tenha sido usado com referência ao teor de umidade ótimo, que é o

teor de umidade correspondente à máxima massa específica aparente, usado para determinações de procedimentos em solos, entretanto, no caso de mistura asfáltica essa associação é utilizada de forma equivocada, pois existem diversos parâmetros a serem levados em consideração, para a determinação do teor de ligante asfáltico de projeto.

Durante a evolução dos procedimentos de dosagem, diversas formas de compactação de amostras vêm sendo desenvolvidos. Dependendo do sistema, as amostras podem ser, quanto à forma, (Figura 3.1), cilíndricas, trapezoidais, ou retangulares, e a compactação pode ser realizada através de impacto, amassamento, vibração ou rolagem (Harman et al., 2002)

O Teor de ligante varia de acordo com alguns parâmetros entre eles são o método de dosagem, energia de compactação, tipo de mistura, temperatura entre outros. O método de dosagem mais usado mundialmente é chamado de método Marshall que recebeu esse nome em referência ao engenheiro Bruce Marshall e foi desenvolvido na década de quarenta que consiste no uso da compactação por impacto.

Na década de 1980 nos Estados Unidos da América muitos pavimentos de tráfego pesado estavam sofrendo com as evidências de deformações permanentes e prematuras que atribuíram a essas deformações o uso em excesso de ligante na mistura e acreditaram que a culpa dessas patologias seria a compactação por impacto, então se criou outro método de dosagem denominado Superpave que consiste na compactação por amassamento.

Acredita-se que a compactação por impacto nos apresenta densidade que não condiz com as de pavimentos em campo. O método SHRP-Superpave ainda não é muito utilizado no Brasil, mesmo que existam várias teses sobre o assunto no país.

Figura 3.1 – Exemplos de corpos-de-prova de diversas formas e compactadores de misturas asfálticas



### ***2.2.1 Dosagem Marshall***

O Método de dosagem Marshall de misturas asfálticas (DNER-ME O43/95) é o método oficial no Brasil e o mais utilizado, foi desenvolvido em meados do século XX no decorrer da Segunda Guerra Mundial para aprimorar a proporção ligante agregado, pois havia uma necessidade de um pavimento mais resistente para o pouso de aeronaves de militares.

Originalmente a compactação Marshall utilizava um esforço de 25 golpes com um soquete Proctor, seguido de aplicação de uma carga estática de 5000 libras (2.268 kgf) durante dois minutos. A aplicação dessa carga tinha a finalidade de nivelar a superfície do corpo-de-prova, a superfície final não era totalmente plana. Outras fontes citam a compactação inicial como sendo de 10 golpes seguidos de mais 5. (White, 1985 p.206)

Através da análise de trechos experimentais, verificou-se que o teor de ligante escolhido com o uso do Método Marshall era muito elevado. As seções construídas com os teores escolhidos apresentavam exsudação com o decorrer do tempo devido a pós-compactação que o tráfego causava. Esse fato indicou que o esforço de compactação então empregado em laboratório era leve, não representando a compactação exercida em campo. (White, 1985 p.206)

Com base nessas observações, estudos foram realizados para identificar o esforço de compactação que levaria à escolha de um teor de ligante adequado. Variações de peso e diâmetro do soquete se seguiram, resultando na adoção do peso de 10 libras (4,54 kgf), 50 golpes e diâmetro de 3 7/8” (White 1985 p.207 ).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A dosagem Marshall procedeu com a composição granulométrica, pesagem das porções de cada corpo de prova, aquecimento, adição da massa de ligante asfáltico, mistura e compactação dos corpos de prova. Sequencialmente, procedeu-se com a determinação dos parâmetros Marshall seguido pela determinação da resistência ao ensaio cântabro e resistência à tração por compressão diametral.

#### 3.1 Composição Granulométrica

A faixa granulométrica dos agregados adotada nesse trabalho foi a de número I da especificação do DNER 386/99 - Pavimentação-Pré-misturado a quente com asfalto Polímero-camada porosa de atrito.

Os agregados: brita ½”, pedrisco, pó de pedra e cal, foram fornecidos pela pedreira empresa Usicity. O ligante asfáltico modificado por polímero SBS, denominado de Capflex 60/85 E foi fornecido pela BR Distribuidora.

Na Figura 3.1.1 é apresentado as faixas granulométricas da especificação do DNER 386/99. Observe-se que para faixa utilizada nesse trabalho a espessura adotada em campo é de 3,0 cm.

Figura 3.1.1 – Faixas granulométricas especificação DNER 386/99

Peneira de malha quadrada		Percentagem 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					± 0,3

As faixas I e II são recomendadas para espessuras de camadas de 3,0cm, e as III, IV e V, para espessuras de até 4,0 cm.

Fonte: DNER-ES 386/99, 1999 p.4

Após a determinação granulométrica dos agregados procedeu-se com a composição dos agregados de forma a enquadrar na faixa I da especificação DNER 386/99.

Na Figura 3.1.2, é apresentado a composição granulométrica, com os agregados: brita ½”, pedrisco, pó de pedra e cal, bem como também a faixa granulométrica.

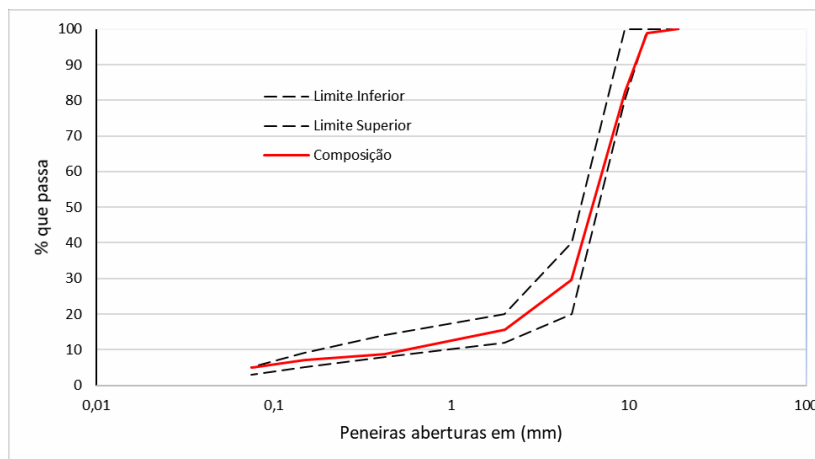
Figura 3.1.2 - Composição dos Agregados

Peneiras	Materiais				Composição	Faixa DNER 386/99	
(mm)	Brita 1/2"	Pedrisco	Pó de pedra	Cal		Limite Inf.	Limite Sup.
19,1	100	100	100	100	100,0	100	100
12,7	98,2	100	100	100	98,8	100	100
9,52	73,6	99,7	100	100	82,5	80	100
4,76	7,8	40,5	99,9	100	29,6	20	40
2	3,7	5,2	67,4	100	15,7	12	20
0,42	2,9	3	32,2	100	8,9	8	14
0,149	2,6	2,7	23,1	100	7,1	5	9
0,075	2,1	2,1	13,9	88,7	5,0	3	5
Composição	0,66	0,16	0,17	0,01			

Fonte: Própria (2018)

As proporções: 66% de brita ½”, 16% de pedrisco, 17% de pó de pedra e 1% de cal, foram determinadas com o emprego do programa computacional “solver”. Na Figura 3.1.3 é apresentado a composição granulométrica bem com a distribuição granulométrica da faixa I da especificação DNER 386/99.

Figura 3.1.3 - Composição Granulométrica e faixa I da especificação DNER 386/99



Fonte: Própria (2018)

## 3.2 Preparo dos Corpos de Prova

Determinada a composição granulométrica, procedeu-se com o preparo dos corpos de prova. Primeiramente, os agregados foram secos em estufa, (Figuras 3.2.1 a 3.2.4)



Figura 3.2.1 - Brita ½"



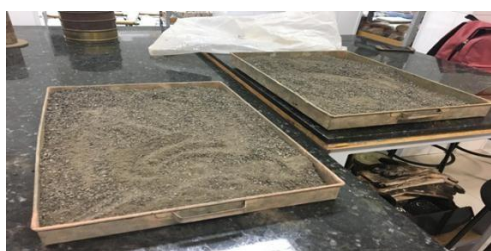
Fonte: Própria (2018)

Figura 3.2.2 - Pedrisco



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.2.3 - Pó de pedra



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.2.4 - Cal CH-I



Fonte: Própria (2018)

Com a composição granulométrica conseguimos identificar as quantidades necessárias para a fabricação dos corpos de prova compostos com 66% de Brita ½, 16% de Pedrisco, 17% Pó de Pedra e 1 % de Cal (Tabela 3.2.1) procedeu-se com o preparo dos corpos de prova. Foram preparadas dez porções, (Figura 3.2.5) sendo que para cada teor de ligante asfáltico foi destinado dois corpos de prova. Cada bandeja com um corpo de prova foi colocada em estufa a temperatura de 170°C (Figura 3.2.6), por tempo suficiente para atingir a temperatura de usinagem.

Tabela 3.2.1 – Composição e massa dos corpos de prova tipo Marshall

Composição (%)				
Brita ½"	Pedrisco	Pó de pedra	Cal	Total
66%	16%	17%	1%	100%
780g	193g	204g	12g	1200g

Fonte: Própria (2018)



Figura 3.2.5 – Bandejas dos corpos de prova já pesados



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.2.6 – Bandejas dos corpos de prova colocados em estufa 170°C



Fonte: Própria (2018)

O Ligante que utilizamos foi do tipo CAPFLEX 60/85 calculamos os teores em porcentagem de 3%, 3,5%, 4%, 4,5% e 5% para a moldagem dos CPs, e com cada teor moldamos dois corpos-de-prova para serem feitos os ensaios para obtenção dos parâmetros Marshall e também a permeabilidade.

Com as porcentagens foram determinados os valores das massas de ligante asfáltico adicionados à mistura, com a seguinte equação (1):

$$Tl = (MI / Ma + MI) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Tl = Teor de ligante (%);

MI = Massa de ligante (g);

Ma = Massa do agregado (g);

Os cálculos apresentaram os seguintes valores de massa para os ligantes como são apresentados na Tabela 3.2.2

Tabela 3.2.2 - Massas de ligante asfáltico para cada teor

<u>Dados dos Cps</u>	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10
% LIGANTE	3%	3%	3,5%	3,5%	4%	4%	4,5%	4,5%	5%	5%
MASSA DE LIGANTE (g)	37,11	37,11	43,52	43,52	50	50	56,54	56,54	63,16	63,16
MASSA TOTAL DO CP (g)	1234,5	1237,55	1238,67	1243,17	1240,65	1254,93	1241,42	1244,11	1247,66	1268,9

Fonte: Própria (2018)

Com os respectivos valores determinados, tanto da massa dos agregados como da massa de ligante os corpos de prova foram moldados conforme sequência a seguir:

Conforme especificação do fornecedor do ligante asfáltico, a temperatura de usinagem recomendada para ligante asfáltico foi de 155°C a 160°C. Para tal, o ligante asfáltico foi inicialmente aquecido em estufa e em seguida a temperatura de usinagem do ligante asfáltico foi atingida com auxílio de um fogareiro. (Figura 3.2.7) Registra-se que o ligante asfáltico foi constantemente misturado para que não ocorresse a queima do mesmo.

Figura 3.2.7 – Aquecimento do ligante asfáltico com emprego de fogareiro



Fonte: Própria (2018)

Para a mistura entre os agregados devem estar a uma temperatura de 10 a 15°C acima da temperatura que está o ligante, com isso foi feita a homogeneização dos agregados com o betume podemos observar essa adição do ligante asfáltico aos agregados na Figura 3.2.8.

Figura 3.2.8 – Adição do ligante asfáltico ao agregados



Fonte: Própria (2018)

Após a adição do ligante asfáltico, procedeu-se com a homogeneização enérgica da mistura para que haja uma uniformidade da mesma e assim fizemos com todos os dez corpos de prova até que todos estejam no ponto para serem moldados, observamos que conforme era maior o percentual de ligante mais fácil se tornava a trabalhabilidade da mistura, sendo assim, mais rápida sua mistura. Na Figura 3.2.9 pode-se verificar o corpo de prova n. 4 com 3,5% de ligante sendo misturado.

Figura 3.2.9 - Homogeneização da mistura



Fonte: Própria (2018)

Com essa mistura ainda quente foi feita a compactação do corpo de prova. Primeiramente, para cada corpo de prova, foi montada a base, o cilindro e o colar do conjunto previamente aquecido, em seguida foi colocado um papel filtro para que a mistura não tenha contado direto com a base metálica, a mistura foi colocada no interior do molde e novamente foi colocado um papel filtro para evitar o contato direto da mistura com a base do soquete. Foi utilizado um compactador de Marshall mecânico para fazer essa parte do processo, os corpos de prova foram submetidos a 50 golpes ininterruptos de cada face da amostra, conforme preconiza a norma DNER 386/99 para esse tipo de mistura. (Figura 3.2.10)

Figura 3.2.10 - Compactador de Marshall Mecânico



Fonte: Própria (2018)

Realizamos os passos anteriores em todas as confecções de todos os corpos de prova, foram feitos dez corpos-de-prova, (Figura 3.2.11) com as mesmas proporções de agregados, porém, trocamos os percentuais de ligante para serem realizados os ensaios e analisarmos o quanto a porcentagem de ligante asfáltico e a forma dos agregados a influencia na permeabilidade da mistura.

Figura 3.2.11 - Amostras Compactadas



Fonte: Própria (2018)



Com as amostras devidamente compactadas, foram colocadas para o seu resfriamento em temperatura ambiente, deixamos um dia para deformarmos os moldes. Na Figura 3.2.12 é apresentado o detalhe da superfície de um dos corpos de prova compactado.

Figura 3.2.12 - Detalhe da superfície da amostra compactada



Fonte: Própria (2018)

### 3.3 Parâmetros Marshall

Após o resfriamento os corpos de prova foram desmoldados (Figura 3.2.13) e foram medidas as dimensões do mesmo, por se tratar de um material com dimensões não uniformes realizamos cinco medidas em diferentes partes para obtermos uma média para o diâmetro e a altura. (Figura 3.2.14)

Figura 3.2.13 – Corpos de prova desformados



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.2.14 - Dimensões dos corpos de prova



Fonte: Própria (2018)

Foi determinado para cada corpo-de-prova suas dimensões, altura (h) e diâmetro (d) para a determinação do volume de cada corpo de prova. Foram também mediadas as massas de cada corpo de prova. A determinação da massa específica aparente foi obtida considerando o volume resultado da medição pelo paquímetro. Para a determinação da massa específica máxima medida (MEMM), também denominada de densidade máxima teórica, um corpo de prova de cada teor, após a determinação do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi desmanchado para a determinação da MEMM.

Na Tabela 3.2.3 é apresentado os resultados das dimensões de cada corpo de prova, bem como as respectivas massas específicas aparente e também as massas específicas máximas medidas e por fim, o volume de vazios de cada corpo de prova.

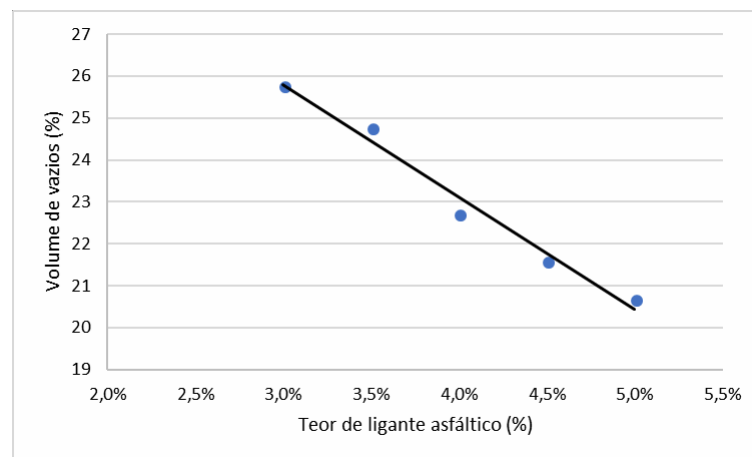
Tabela 3.2.3: Parâmetros de dimensões, massas específicas aparente e máxima medida e volume de vazios

% deligante	3,00%		3,50%		4,00%		4,50%		5,00%	
Altura média (cm)	7,51	7,39	7,41	7,5	7,47	7,39	7,37	7,4	7,35	7,47
Área (cm <sup>2</sup> )	80,96	81,06	80,84	80,67	78,85	80,92	79,65	79,32	79,86	79,92
Volume (cm <sup>3</sup> )	608,00	599,00	599,00	605,00	589,00	598,00	587,00	587,00	587,00	597,00
Massa ao ar (g)	1234,5	1237,55	1238,67	1243,17	1240,65	1254,693	1241,42	1244,11	1247,66	1268,9
M.esp.ap.seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,030	2,066	2,068	2,055	2,106	2,098	2,115	2,119	2,125	2,125
MEMM (g/cm <sup>3</sup> )	2,76	2,76	2,74	2,74	2,72	2,72	2,7	2,7	2,68	2,68
Vv (%)	26,4	25,1	24,5	25,0	22,6	22,9	21,7	21,5	20,7	20,7

Fonte: Própria (2018)

Na Figura 3.2.15 é apresentado a evolução do volume de vazios em função do teor de ligante asfáltico

Figura 3.2.15 - Volume de vazios em função do teor de ligante asfáltico



Fonte: Própria (2018)

### 3.3.1 Permeabilidade

A permeabilidade do pavimento depende muito dos canais drenantes nele compostos e do volume de vazios comunicantes da mistura, os vazios são determinados pela granulometria definidos e empregados na execução do pavimento.

Para obtenção do coeficiente de permeabilidade foi seguido os seguintes passos:

1º passo – Foram selecionados um corpo de prova de cada teor e cada corpo de prova teve sua lateral envolvida com uma fita “crepe” de forma que não ocorresse percolação de água pela lateral do corpo de prova (Figura 3.3.1.1). Em seguida foi acondicionado no tubo de PVC (luva deslizante). (Figura 3.3.1.2)

Figura 3.3.1.1 - Corpo de prova envelopado com fita crepe



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.3.1.2 - Corpo de prova envelopado com fita crepe sendo acondicionado no tubo de PVC



Fonte: Própria (2018)

Após o acondicionamento do corpo de prova na luva de PVC, com uma massa de calafetar preencheu-se a borda superior entre o corpo de prova e a parede interna do tubo de PVC. (Figura 3.3.1.3). Um tubo prolongador com uma saída (tubo ladrão regulador) (Figura 3.3.1.4). Na montagem do conjunto, conforme apresentado na Figura 3.3.1.5, é possível verificar que o corpo de prova fica assente sobre uma base de pedrisco que por sua vez está dentro de uma bandeja.

Figura 3.3.1.3 – Preenchimento do vão entre o corpo de prova a lateral do tubo de PVC



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.3.1.4 – Tubo prolongador com saída reguladora de altura



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.3.1.5 – Conjunto montado sobre uma bandeja com pedrisco



Fonte: Própria (2018)



O volume do tubo acima do corpo de prova é preenchido por água e a quantidade de água adicionada divide-se em duas partes a saber: (i) uma parcela d'água percola pelo corpo de prova, saindo pela parte inferior do corpo de prova e coletado pela bandeja que por sua vez, através de uma oliva esgota a água excedente e (ii) uma outra parcela da água sai pelo ladrão, sendo esse também regulador da altura de lâmina d'água sobre o corpo de prova.

Após a coluna de água estar estabilizada e a água que sai pelo ladrão estar contínua, mede-se, com o auxílio de uma trena, a altura da lâmina d'água até a borda superior do tubo, (Figura 3.3.1.6). Para a determinação da carga hidráulica foi necessário também a determinação da altura da borda superior do tubo até o nível da lâmina d'água da bandeja. (Figura 3.3.1.7)

Figura 3.3.1.6 – Determinação da carga hidráulica



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.3.1.7 – Determinação da altura entre a borda superior do tubo de PVC e a lâmina d'água da bandeja



Fonte: Própria (2018)

A carga hidráulica é a diferença entre as duas medições. Na Tabela 3.3.1.1 é apresentado a carga hidráulica para cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 3.3.1.1 – Carga hidráulica de cada corpo de prova ensaiado

Teor de ligante (%)	3,00%		3,50%		4,00%		4,50%		5,00%	
Corpo de prova n.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Carga Hidráulica (cm)	17,8	17,8	16,4	19,4	19,9	16,9	16,6	17,1	18,4	17,9

Fonte: Própria (2018)

A determinação da permeabilidade consistiu em medir a vazão de água. Para isso, utilizou-se um becker para medir a massa de água para um dado período de tempo (vazão) que saia pela oliva da bandeja. (Figura 3.3.1.8) A massa de água para cada determinação foi de aproximadamente 600g, foram feitas seis leituras para cada corpo de prova e achou-se uma média entre as medições

Figura 3.3.1.8 – Determinação da vazão



Fonte: Própria (2018)

Nas Tabelas 3.3.1.2 a 3.3.1.11 estão apresentadas as determinações do ensaio da vazão dos dez corpos de prova. Registra-se os valores adotados estão na unidade de  $\text{m}^3/\text{s}$

Tabela 3.3.1.2 – Vazão média do corpo de prova 1

CP 1		
Segundos	M <sup>3</sup>	Vazão m <sup>3</sup> /s
38,16	0,00061892	1,62191E-05
22,55	0,00060437	2,68013E-05
20,07	0,00063552	3,16652E-05
27,41	0,00062216	2,26983E-05
21	0,00060707	2,89081E-05
19,46	0,00065369	3,35915E-05
<b>Média da Vazão</b>		2,66472E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.3 – Vazão média do corpo de prova 2

CP 2		
Segundos	M <sup>3</sup>	Vazão m <sup>3</sup> /s
18,89	0,000624	3,30498E-05
19	0,00065	3,42347E-05
16,04	0,000629	3,91845E-05
14,54	0,000612	4,20757E-05
16,54	0,00063	3,81028E-05
14,25	0,000611	4,28484E-05
<b>Média da Vazão</b>		3,82493E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.4 – Vazão média do corpo de prova 3

CP 3		
Segundos	M³	Vazão m³/s
18,95	0,000599	3,16132E-05
17,07	0,000597	3,4983E-05
16,12	0,000604	3,74727E-05
15,54	0,000632	4,06628E-05
15,62	0,000589	3,7678E-05
16,98	0,000648	3,81755E-05
<b>Média da Vazão</b>		3,67642E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.6 – Vazão média do corpo de prova 5

CP 5		
Segundos	M³	Vazão m³/s
26,78	0,0006176	2,3062E-05
23,49	0,00062183	2,64721E-05
19,95	0,00062415	3,12857E-05
18,61	0,00061676	3,31413E-05
17,29	0,00060912	3,52296E-05
16,21	0,00061147	3,77218E-05
<b>Média da Vazão</b>		3,11521E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.8 – Vazão média do corpo de prova 7

CP 7		
Segundos	M³	Vazão m³/s
24,03	0,000627	2,61003E-05
20,78	0,000619	2,98E-05
18,63	0,000607	3,2576E-05
17,22	0,000615	3,5712E-05
16,19	0,000616	3,80624E-05
15,9	0,000642	4,03472E-05
<b>Média da Vazão</b>		3,37667E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.10 – Vazão média do corpo de prova 9

CP 9		
Segundos	M³	Vazão m³/s
16,46	0,0006214	3,77521E-05
15,13	0,000601	3,97224E-05
14,79	0,00060954	4,1213E-05
14,28	0,00060512	4,23754E-05
14,26	0,00062088	4,354E-05
14,39	0,00061295	4,25956E-05
<b>Média da Vazão</b>		4,11997E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.5 – Vazão média do corpo de prova 4

CP 4		
Segundos	M³	Vazão m³/s
22,43	0,00062	2,76469E-05
18,68	0,000625	3,34679E-05
15,54	0,000589	3,79054E-05
14,61	0,000611	4,18207E-05
14,05	0,000596	4,24242E-05
13,77	0,000624	4,52869E-05
<b>Média da Vazão</b>		3,8092E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.7 – Vazão média do corpo de prova 6

CP 6		
Segundos	M³	Vazão m³/s
20,41	0,0006	2,93729E-05
17,76	0,000586	3,30E-05
17,26	0,000618	3,58111E-05
16,78	0,000623	3,71532E-05
15,02	0,000599	3,98668E-05
15,26	0,000623	4,08224E-05
<b>Média da Vazão</b>		3,60027E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.9 – Vazão média do corpo de prova 8

CP 8		
Segundos	M³	Vazão m³/s
25,61	0,000623	2,43221E-05
21,17	0,000619	2,93E-05
17,89	0,000598	3,34041E-05
16,67	0,000631	3,78344E-05
15,65	0,000631	4,03003E-05
15,37	0,000647	4,20722E-05
<b>Média da Vazão</b>		3,45316E-05

Fonte: Própria (2018)

Tabela 3.3.1.11 – Vazão média do corpo de prova 10

CP 10		
Segundos	M³	Vazão m³/s
18,41	0,000616	3,34677E-05
16,54	0,000596	3,6055E-05
15,84	0,00061	3,85271E-05
15,38	0,000614	3,98953E-05
15,7	0,000634	4,03631E-05
13,9	0,000628	4,51942E-05
<b>Média da Vazão</b>		3,89171E-05

Fonte: Própria (2018)

Observamos que, inicialmente a água passava de forma mais lenta, pois seria necessário que o corpo de prova estivesse melhor saturado para termos uma uniformidade na medição da vazão.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade (Ks) foi utilizado a equações 2 e 3

$$K = Q / i * a \quad (2)$$

Onde:

K = Coeficiente de Permeabilidade (m/s);

i = Gradiente Hidráulico – relação entre a carga hidráulica e altura do corpo de prova

a = área (m<sup>2</sup>)

$$Q = V / t \quad (3)$$

Onde:

Q = Vazão (m<sup>3</sup>/s);

V = Volume (m<sup>3</sup>)

t = Tempo (s)

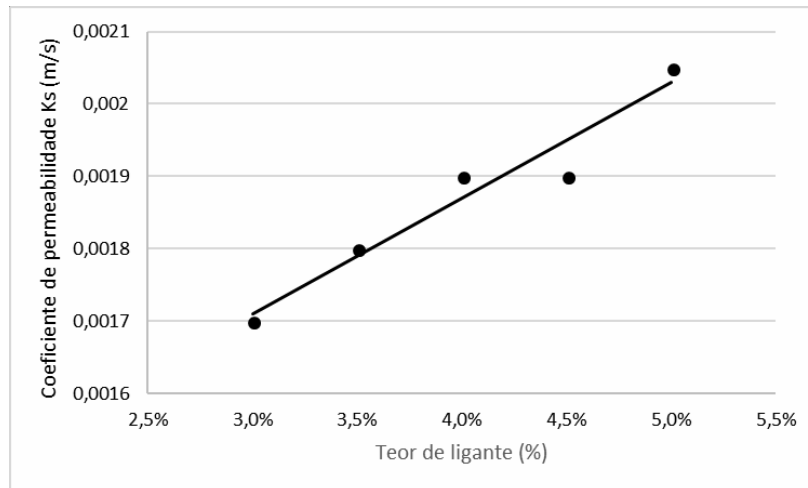
Na Tabela 3.3.1.12 é apresentado o coeficiente de permeabilidade (Ks) para os dez corpos de prova testados. É apresentado também o gradiente hidráulico e média das vazões obtidas. Na Figura 3.3.1.9 é apresentado a evolução do coeficiente permeabilidade (Ks) em função do teor de ligante asfáltico.

Tabela 3.3.1.12 Coeficientes de permeabilidade (Ks)

Resultados do Ensaio de Permeabilidade				
	VAZÃO(m <sup>3</sup> /s)	K (m/s)	i (m)	H (m)
CP 1	2,66E-05	0,0014	2,37	0,178
CP 2	3,82E-05	0,0020	2,41	0,178
CP 3	3,68E-05	0,0020	2,25	0,167
CP 4	3,81E-05	0,0018	2,59	0,194
CP 5	3,12E-05	0,0015	2,67	0,199
CP 6	3,60E-05	0,0019	2,29	0,169
CP 7	3,38E-05	0,0019	2,25	0,166
CP 8	3,45E-05	0,0019	2,31	0,171
CP 9	4,12E-05	0,0021	2,50	0,184
CP 10	3,89E-05	0,0020	2,40	0,179

Fonte: Própria (2018)

Figura 3.3.1.9 - Coeficiente de Permeabilidade x Porcentagem de Ligante



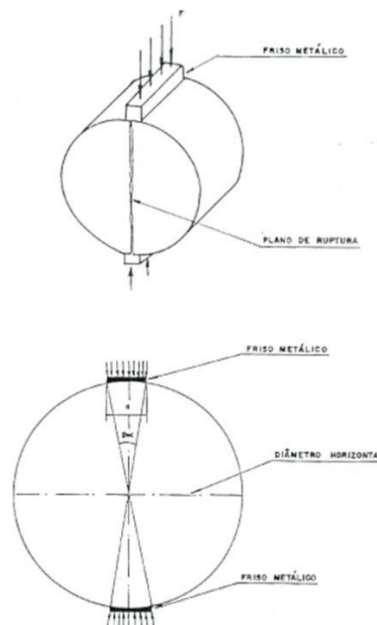
Fonte: Própria (2018)

### 3.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, preconizado na norma NBR15087 de 09/2012 - Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral, trata-se de um ensaio que consiste em aplicar uma força diametralmente oposta nas geratrizes externa do corpo de prova até que atinja a sua carga máxima e haja a sua ruptura.

Na Figura 3.4.1 é mostrada o esquema de como as forças atuam no corpo de prova.

Figura 3.4.1 Ensaio de Compressão Diametral de corpo de prova cilíndrico



Fonte: NBR15087 de 09/2012 - Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Foram separados em dois grupos de cinco corpos de prova cada, sendo um corpo de prova de cada teor de ligante asfáltico para serem feitos os ensaios: (i) resistência à tração por compressão diametral e (ii) resistência ao ensaios cãtabro. O conjunto destinado ao ensio de resistência à tração por compressão diametral foi primeiramente climatizado a temperatura de ensaio (25°C) em seguida foram colocados na prensa de compressão diametral conforme apresentado na Figura 3.4.2.

Figura 3.4.2 – Prensa de compressão diametral



Fonte: Própria (2018)

O Ensaio fornece a carga de ruptura que do corpo de prova, a resistência e obtida em  $\text{kgf/cm}^2$ . Os resultados dos corpos de prova testados estão apresentados na Tabela 3.4.1.

Tabela 3.4.1: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

	CP 1	CP 4	CP 5	CP 7	CP 9
PORCENTAGEM DE LIGANTE (%)	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%
ALTURA (cm)	7,513	7,497	7,466	7,367	7,353
DIÂMETRO (cm)	10,148	10,138	10,023	10,075	10,084
CARGA DE RUPTURA (kgf)	366	417	542	586	721
RESISTÊNCIA A TRAÇÃO ( $\text{kgf/cm}^2$ )	3,06	3,49	4,61	5,03	6,19

Fonte: Própria (2018)

Para o cálculo da resistência a tração utilizou-se a seguinte equação (7):

$$\sigma_t = (2 \cdot F) / (\pi \cdot d \cdot h) \quad (7)$$

Onde:

$\sigma_t$  = Resistência a Tração (kgf/cm<sup>2</sup>);

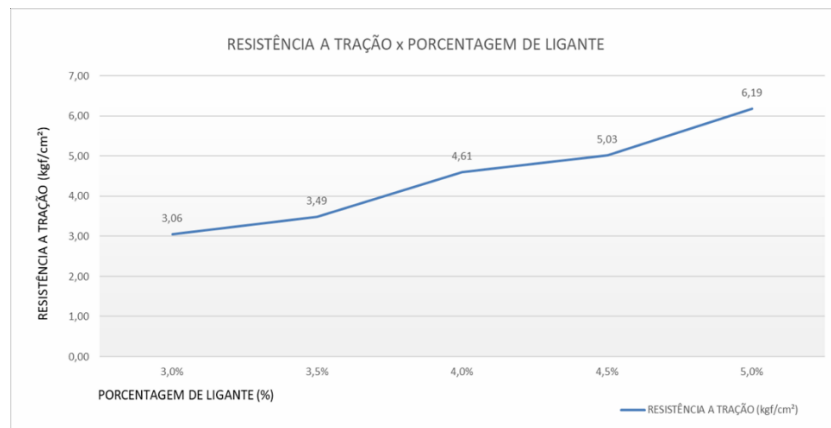
F = Carga de Ruptura (kgf);

d = Diâmetro (cm)

h = Altura (cm)

Na Figura 3.4.3 é apresentado a resistência à tração por compressão diametral em função da porcentagem de ligante.

Figura 3.4.3 – Resistência à tração por compressão diametral x Porcentagem de Ligante



Fonte: Própria (2018)

### 3.5 Resistência ao Ensaio Cântabro

Este ensaio foi desenvolvido na Espanha na região da Cantábria tem o objetivo de medir a adesividade do ligante asfáltico à superfície do agregado de misturas asfálticas de graduação aberta tipo CPA. No Brasil, através da norma DNER 386/99, é especificado o limite de 25% de perda para misturas asfálticas CPA.

No ensaio é utilizado uma máquina “Los Angeles” sem a carga abrasiva (esferas de aço). Para essa pesquisa o ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP.



### 3.5.1 Procedimento e Resultado

Para o conjunto de cinco corpos de prova, sendo um corpo de prova de cada teor de ligante asfáltico, foram primeiramente, colocado um corpo de prova por vez, sem as esferas de aço, com ele fechado, a máquina foi acionada para realizar 300 revoluções do tambor, a uma velocidade de 30 a 33 rpm, a uma temperatura aproximada de 25 C. Completadas as 300 revoluções, o corpo de prova foi retirado do tambor e mediu-se o seu peso.

### 3.5.2 Cálculo

O desgaste da mistura asfáltica por abrasão, em porcentagem e dado pela formula (8):

$$A = ((P - P') / P) * 100 \quad (8)$$

Onde:

A = desgaste da mistura betuminosa;

P = peso do corpo-de-prova;

P' = peso do corpo-de-prova após o ensaio.

CPs após ensaio de Cântabro:

Nas Figuras 3.5.2.1 a 3.5.2.5 estão apresentados o que resultou do corpo de prova após o ensaio de cantabro.

Figura 3.5.2.1 – Detalhe do corpo de prova n.2 após ensaio cântabro



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.5.2.2 – Detalhe do corpo de prova n.3 após ensaio cântabro



Fonte: Própria (2018)



Figura 3.5.2.3 – Detalhe do corpo de prova n.6 após ensaio cântabro



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.5.2.4 – Detalhe do corpo de prova n.8 após ensaio cântabro



Fonte: Própria (2018)

Figura 3.5.2.5 – Detalhe do corpo de prova n.10 após ensaio cântabro



Fonte: Própria (2018)

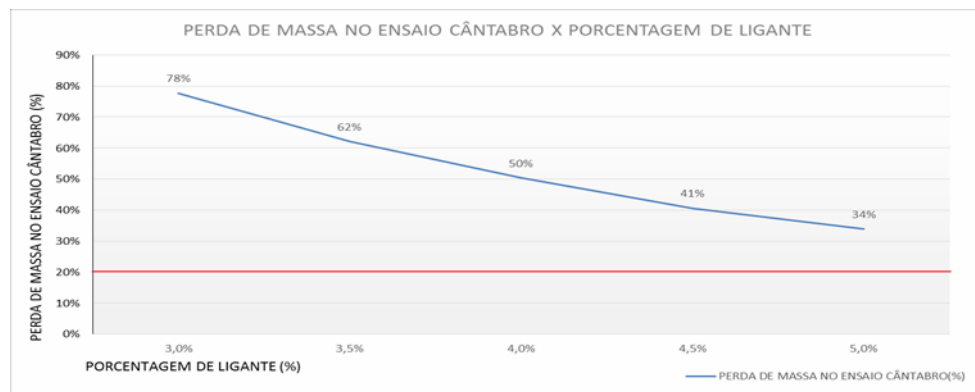
Na Tabela 3.5.2.1 é apresentado os resultados de resistência ao ensaio cantabro dos corpos de prova testados e na Figura 3.5.2.6 o gráfico do resultado de cantabro em função do teor de ligante asfáltico.

Tabela 3.5.2.1 – Resultado do ensaio de cântabro

Dados do Ensaio de Cântabro					
	CP 2	CP 3	CP 6	CP 8	CP 10
PORCENTAGEM DE LIGANTE (%)	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%
MASSA INICIAL DO CORPO DE PROVA(g)	1237,55	1238,67	1254,93	1244,11	1268,9
MASSA DO CORPO DE PROVA APÓS ENSAIO(g)	275,48	469,87	623,48	739,29	839,78
PERDA DE MASSA NO ENSAIO CÂNTABRO(%)	78%	62%	50%	41%	34%

Fonte: Própria (2018)

Figura 3.5.2.6 - Perda de Massa no Ensaio Cântabro x Porcentagem de Ligante



Fonte: Própria (2018)

## **4. RESULTADOS E COMENTÁRIOS**

As misturas asfálticas abertas do tipo CPA – camada porosa de atrito – mantêm uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças às pequenas quantidades de fíler, de agregado miúdo e de ligante asfáltico. Essas misturas asfálticas a quente, conforme preconiza a norma do DNER 386/99 – Pavimentação – pré-misturado com asfalto polímero – camada porosa de atrito, além dos quesitos quanto as características dos agregados graúdos: forma, resistência e durabilidade e também para os agregados miúdos para o ensaio de equivalente de areia, a obediência na composição granulométrica para com a faixas especificadas, a norma apresenta os seguintes parâmetros que devem satisfazer a mistura asfáltica tipo CPA:

- Volume de vazios entre 18% a 25%
- Desgaste abrasão Los Angeles – Ensaio Cantabro (%) máximo de 25%
- Resistência à tração por compressão diametral mínimo de 5,5 kgf/cm<sup>2</sup>

### **4.1 Volume de Vazios**

O volume de vazios obtido com a mistura asfáltica testada variou entre 20,7% e 25,7%. A norma especifica valores entre 18% e 25% para o teor de ligante asfáltico de projeto. Portanto, os valores de volume de vazios obtidos na dosagem apresentam-se dentro dos limites especificados.

### **4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral**

A resistência à tração por compressão diametral obtida com os corpos de prova testados apresentaram valores entre 3,06 e 6,19 kgf/cm<sup>2</sup>. A norma especifica que para o teor de ligante asfáltico de projeto a resistência à tração por compressão diametral deve apresentar valores de no mínimo 5,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Atendendo a esse parâmetro o teor de ligante asfáltico de projeto deve ser superior a 4,7%.

### **4.3 Resistência ao ensaio cântabro**

A norma DNER 386/99 especifica a resistência ao ensaio cântabro de no mínimo 25%. Todos os teores de ligante asfáltico testados apresentaram valores superiores ao especificado.

## 5. CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados, pode-se concluir que a mistura asfáltica não atendeu os requisitos especificados pela norma DNER 386/99. A baixa resistência ao ensaio de cântabro foi o fator decisivo para a não conformidade. Essa baixa resistência pode estar associada a dois fatores: (i) pequena espessura de filme de ligante asfáltico que envolveu os agregados, daí a necessidade de aumentar a espessura com emprego de fibras de celulose à mistura e/ou (ii) forma dos agregados fora de especificação, com excesso de partículas lamelares e alongadas, o que acaba por propiciar uma má densificação da mistura resultando num baixo valor de resistência ao ensaio cântabro. A permeabilidade da mistura apresentou valores na ordem de  $1,7 \cdot 10^{-3}$  a  $2,0 \cdot 10^{-3}$  m/s, valores normalmente encontrados em literatura para esse tipo de mistura.

## **6. SUGESTÕES**

A autora sugere a continuação da pesquisa, utilizando fibra de celulose com o objetivo de se aumentar o teor de ligante asfáltico da mistura. Recomenda também atenção à forma da partícula do agregado graúdo.

## REFERENCIAS

VIRGILIIS , AFONSO LUÍS. PROCEDIMENTOS DE PROJETO E EXECUÇÃO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS VISANDO RETENÇÃO E AMORTECIMENTO DE PICOS DE CHEIAS. 2009. 181 p. Dissertação (Mestre em Engenharia)- USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo , Sao Paulo, 2009. Disponível em: <[http://file:///C:/Users/Celio/Downloads/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_Afonso.pdf](http://file:///C:/Users/Celio/Downloads/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Afonso.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2018.

DNER-ES 386/99. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PAVIMENTAÇÃO - PRE-MISTURADO A QUENTE COM ASFALTO POLÍMERO - CAMADA POROSA DE ATRITO** . 1999. ed. RIO DE JANEIRO: DNER, 1999. 15 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dner-es386-99.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

MOURA, EDSON . **APOSTILA DE PROJETO DE PAVIMENTO** . Sao Paulo: [s.n.], 2018. 120 p. Disponível em: <[http://www.professoredmoura.com.br/download/Proj\\_Pav\\_1\\_2018.pdf](http://www.professoredmoura.com.br/download/Proj_Pav_1_2018.pdf)>. Acesso em: 01 fev. 2018.

BERNUCCI, Liedi et al. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA** : Formação Básica para Engenheiros . RIO DE JANEIRO: Universidade Petrobras, 2010. 120 p. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2011/08/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o-Asf%C3%A1ltica-cap1.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

MOURA, EDSON . **ESTUDO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM TRILHA DE RODA DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM PISTA E EM LABORATÓRIO** . 2010. 299 p. TESE (Doutor em Engenharia de Transportes)- USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo , São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-17082010-094223/pt-br.php>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

DNER-ES 383/99. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DESGASTE POR ABRASÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ASFALTO POLÍMERO - ENSAIO CÂNTABRO** . São Paulo: DNER, 1999. 2 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me383-99.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

DNER-ME 043/95. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE - ENSAIO MARSHALL** . São Paulo: DNER, 1995. 11 p. Disponível em: <[http://www.ippuc.org.br/cd\\_caderno\\_de\\_encargos/volume%2003\\_PDF/DNER-ME%20043-95.pdf](http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20043-95.pdf)>. Acesso em: 01 fev. 2018.

DNER-ME 138/94. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . **DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL** . RIO DE JANEIRO: DNIT, 1994. 6 p. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/normas/Determinacao%20da%20Resistencia%20a%20Tracao%20-%20VERSAO%20DEFINITIVA.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

PEREIRA, Antonio Carlos. **Influência da Drenagem subsuperficial no desempenho de pavimentos asfálticos** . 2003. 222 p. Dissertação (Mestre em Engenharia)- USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <[http://file:///C:/Users/WINDOWS/Downloads/InfluenciadaDrenagemSubsuperficialnoDesempenhodePavimentosAsfalticos%20\(1\).pdf](http://file:///C:/Users/WINDOWS/Downloads/InfluenciadaDrenagemSubsuperficialnoDesempenhodePavimentosAsfalticos%20(1).pdf)>. Acesso em: 06 fev. 2018.



## APENDICE

### APENDICE A - TABELAS

Tabela Dados dos CPs

Dados dos Cps

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10
% LIGANTE	3%	3%	3,5%	3,5%	4%	4%	4,5%	4,5%	5%	5%
MASSA DE LIGANTE (g)	37,11	37,11	43,52	43,52	50	50	56,54	56,54	63,16	63,16
MASSA TOTAL DO CP (g)	1234,5	1237,55	1238,67	1243,17	1240,65	1254,93	1241,42	1244,11	1247,66	1268,9
MASSA IMERSA (g)	751,04	754,8	751,55	750,8	743,95	751,36	743,52	746,22	757,3	752,47
MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	2,55	2,56	2,54	2,52	2,50	2,49	2,49	2,50	2,54	2,46
DIÂMETRO (m)	0,10148	0,10156	0,10143	0,10138	0,10023	0,1015	0,10075	0,10058	0,10084	0,10091
RAIO(m)	0,05074	0,05078	0,050715	0,05069	0,050115	0,05075	0,050375	0,05029	0,05042	0,050455
ALTURA (m)	0,07513	0,07394	0,07416	0,07497	0,07466	0,07388	0,07367	0,07394	0,07353	0,07467
ÁREA (m <sup>2</sup> )	0,008	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
VOLUME (m <sup>3</sup> )	6,08E-04	5,99E-04	5,99E-04	6,05E-04	5,89E-04	5,98E-04	5,87E-04	5,87E-04	5,87E-04	5,97E-04

Fonte: Própria (2018)

Tabela Dados do Ensaio de Permeabilidade

Dados do ensaio de Permeabilidade

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10
VAZÃO(m <sup>3</sup> /s)	2,66472E-05	3,82493E-05	3,67642E-05	3,8E-05	3,12E-05	3,60027E-05	3,37667E-05	3,45316E-05	4,12E-05	3,89E-05
COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE(m/s)	0,0014	0,0020	0,0020	0,0018	0,0015	0,0019	0,0019	0,0019	0,0021	0,0020
GRADIENTE HIDRÁULICO	2,37	2,41	2,25	2,59	2,67	2,29	2,25	2,31	2,50	2,40
CARGA HIDRÁULICA (m)	0,178	0,178	0,167	0,194	0,199	0,169	0,166	0,171	0,184	0,179

Fonte: Própria (2018)

Tabela Densidade Aparente e Volume de Vazios

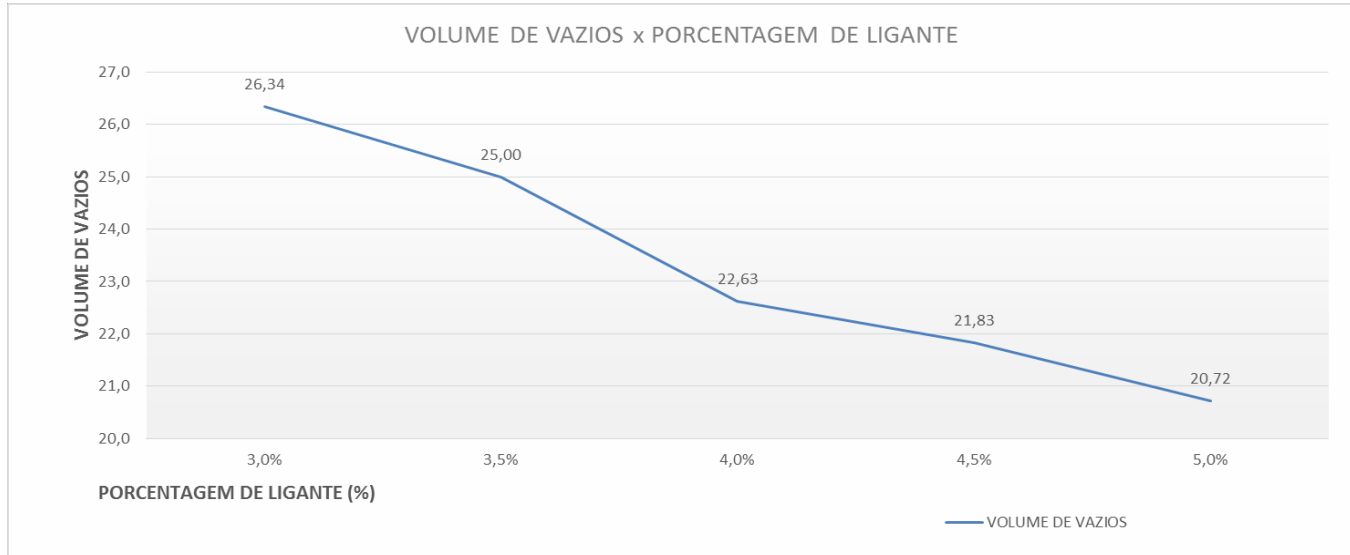
Dados dos Cps

	CP 1	CP 4	CP 5	CP 7	CP 9
% LIGANTE	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%
MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	2,55	2,52	2,50	2,49	2,54
DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA (g/cm <sup>3</sup> ) (calculado)	2,76	2,74	2,72	2,70	2,68
DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA (g/cm <sup>3</sup> ) (medido)	2,76	2,74	2,72	2,70	2,68
DENSIDADE APARENTE (g/cm <sup>3</sup> )	2,032	2,054	2,106	2,114	2,125
VOLUME DE VAZIOS	26,34	25,00	22,63	21,83	20,72

Fonte: Própria (2018)

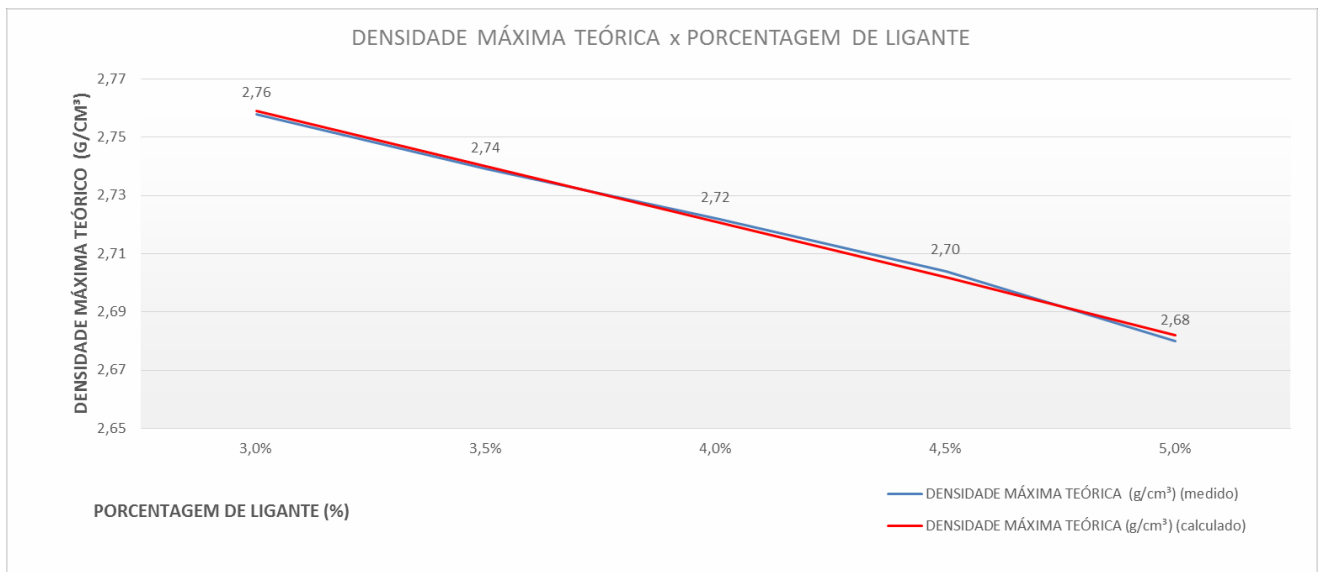
## APENDICE B – Gráficos

Figura Gráfico Volume de Vazios



Fonte: Própria (2018)

Figura Gráfico Densidade Máxima Teórica



Fonte: Própria (2018)