

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

DAIANA BARCELOS FURTADO

**PROJETO DE DOSAGEM E DIMENSIONAMENTO DE UM
PAVIMENTO ASFÁLTICO POROSO PARA UMA ÁREA DE
ESTACIONAMENTO**

UBERLÂNDIA – MG
2017

DAIANA BARCELOS FURTADO

PROJETO DE DOSAGEM E DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO POROSO PARA UMA ÁREA DE ESTACIONAMENTO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao programa de
graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia
para a obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Pires
Leandro

UBERLÂNDIA – MG
2017

DAIANA BARCELOS FURTADO

PROJETO DE DOSAGEM E DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO POROSO PARA UMA ÁREA DE ESTACIONAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso da aluna Daiana Barcelos Furtado, apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em _____, de _____ de _____.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dr. Rodrigo Pires Leandro
Professor Orientador - UFU

Dr. Carlos Eugênio Pereira
Professor - UFU

Dra. Leila Aparecida de Castro Motta
Professora - UFU

Aos meus queridos pais Andréa e José, pelo apoio e carinho, ao meu companheiro de todas as jornadas Guilon pela ajuda, apoio e compreensão, a Deus, minha linha guia e por fim a mim, pela força de vontade, superação e perseverança que sempre tive e terei.

Agradecimentos

Aos meus pais Andréa e José, que me permitiram chegar onde estou hoje, me apoiando em todas as decisões que tomei;

Ao meu companheiro, noivo Guilon, por todo o apoio e suporte necessário que me deu, por estar comigo em todas as frustrações e sucessos da minha vida, sempre ao meu lado;

Ao Professor Rodrigo Pires Leandro não só pela dedicação, mas também pelo companheirismo, por acreditar sempre no meu melhor. Me aceitou como orientanda e confiou no meu trabalho, na minha competência e esteve sempre presente quando precisei, me dando suporte para concluir esse trabalho;

À técnica laboratorista Amanda, pela ajuda nos experimentos, por meses de trabalhos intensos e cansativos, mas divertidos do qual sentirei falta;

Às empresas Betunel e Britamix pelo fornecimento do material necessário para o estudo desse trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um projeto de dosagem e dimensionamento de um pavimento asfáltico drenante para seu uso no estacionamento do Campus Santa Mônica, localizado em Uberlândia. O trabalho contemplou a dosagem da mistura asfáltica porosa realizada no laboratório na Faculdade de Engenharia Civil. Avaliaram-se as características dos materiais utilizados na mistura a fim de verificar a resistência da camada porosa de atrito quanto aos parâmetros mecânicos, sua permeabilidade e seu dimensionamento quanto à coleta de água pluvial. O pavimento permeável permite auxiliar o escoamento superficial reduzindo os picos de cheia e consequentemente a incidência de enchentes, além disso anula a lâmina de água formada em pavimentos convencionais afetando diretamente na redução do efeito “spray”, aumenta a aderência do pneu-pavimento e reduz o ruído devido ao elevado volume de vazios em sua composição. Se combinado a uma base e sub-base porosa, ainda promove uma eficiente reserva de água pluvial que pode ser infiltrada pelo solo ou reaproveitada sendo, portanto, um sistema sustentável.

Palavras-chave: Concreto asfáltico poroso. Pavimento permeável. Ligante modificado. Estacionamento. Coleta de água pluvial.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo do esqueleto pétreo de algumas misturas asfálticas	15
Figura 2 - Diferentes sistemas de infiltração em pavimentos permeáveis	20
Figura 3 - Exemplos de dispositivos de descarga lateral localizados na parte inferior do Reservatório de Base	21
Figura 4 - Sobrecamada de material poroso sob revestimento convencional	22
Figura 5 - Implementação de pavimento permeável na cidade de São Paulo	23
Figura 6 - Mapa de definição do local de estudo	29
Figura 7 - Localização da área de estacionamento em estudo no Campus Santa Mônica	30
Figura 8 - Área de estacionamento retirada do projeto arquitetônico do campus....	30
Figura 9 - Fluxograma modelo de análise de viabilidade para implantação de pavimento permeável	31
Figura 10 - Fluxograma do método experimentado utilizado no trabalho	32
Figura 11 - Temperatura de trabalho do CAP modificado	33
Figura 12 - Empresa ECOBRIX onde foi realizada a coleta de agregado	34
Figura 13 - Dimensões do agregado a serem medidas (NBR 6954:1989)	37
Figura 14 - Algumas das etapas do ensaio de abrasão.....	41
Figura 15 - Algumas das etapas do ensaio de equivalente de areia	42
Figura 16 - Curvas granulométrica dos agregados.....	45
Figura 17 - Exemplos das curvas granulométricas de diferentes tipos de misturas asfálticas.....	46
Figura 18- Curva granulométrica da Camada Porosa de Atrito (CPA) de acordo com a faixa do DNER-ES 396/99	46
Figura 19 - Algumas etapas da preparação da mistura para ensaio Marshall.....	48
Figura 20 - Algumas etapas do ensaio de densidade máxima teórica da mistura...	50
Figura 21 - Preparação dos corpos-de-prova para ensaio de densidade aparente.	51
Figura 22 - Ensaio Cântabro, aparelho e corpos-de-prova ensaiado	53
Figura 23 - Realização do ensaio de resistência a compressão diametral	54
Figura 24 - Etapas de montagem do sistema	55
Figura 25 - Curvas dos parâmetros determinados pela dosagem Marshall.....	60
Figura 26 - Perfil genérico de pavimento com revestimento, base de reservatório e captação de água por tubo perfurado.....	63

Figura 27 - Ábaco de dimensionamento do pavimento.....	68
Figura 28 - Configuração final do pavimento com CBR do subleito de 3%	72
Figura 29 - Configuração final do pavimento com CBR do subleito de 8%	72
Figura 30 – Sentido de escoamento da água e indicação do reservatório enterrado	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de coeficiente de escoamento superficial para algumas superfícies	24
Tabela 2 - Redução da concentração de poluentes em pavimentos permeáveis....	27
Tabela 3 - Característica do ligante modificado por SBS (Betunel indústria e comércio LTDA).....	33
Tabela 4 - Massa mínima de amostra de ensaio	35
Tabela 5 - Resultado dos ensaios de Massa específica aparente e Absorção.....	37
Tabela 6 - Resultado do ensaio de índice de forma	38
Tabela 7 - Classificação da forma do corpo-de-prova	38
Tabela 8 - Graduação para ensaio	39
Tabela 9 – Carga Abrasiva	39
Tabela 10 - Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles	40
Tabela 11 - Resultado do ensaio de equivalente de areia.....	42
Tabela 12 - Massa mínima, por amostra de ensaio.....	43
Tabela 13 - Resultado da granulometria da Brita 1, Brita 0, Pedrisco com Pó-de-pedra	44
Tabela 14 - Faixas granulométricas da Camada Porosa de Atrito (CPA).....	45
Tabela 15 - Resumo de projeto para dosagem da Camada Porosa de Atrito (CPA).....	48
Tabela 16 - Resultado da densidade máxima teórica da mistura para cada teor de ligante	57
Tabela 17 - Resultados obtidos para densidade aparente do corpo-de-prova	57
Tabela 18 - Resultado obtidos para volume de vazios	58
Tabela 19 - Resultados do ensaio de perda de massa por abrasão cântabro.....	59
Tabela 20 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	59
Tabela 21 - Resultados obtidos no teste de permeabilidade	61
Tabela 22 - Classe de permeabilidade de misturas betuminosas	62
Tabela 23 - Parâmetros volumétricos de três diferentes misturas asfálticas	62
Tabela 24 - Matriz de aplicabilidade de projetos	65
Tabela 25 - Parâmetros dos grãos ensaiados	66
Tabela 26 - Parâmetros estabelecidos para cálculo da porosidade das camadas ..	66

Tabela 27 - Classificação das vias - Tráfego leve e médio.....	67
Tabela 28 - Espessuras mínimas de revestimento	69
Tabela 29 - Coeficientes de equivalência estrutural	70
Tabela 30 - Médias mensais pluviométricas (Dados do INMET).....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BGS – Brita Graduada Simples

CAP – Concreto Asfáltico de Petróleo

CBR – Índice de Suporte Califórnia

CPA – Camada Porosa de Atrito

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

G_{mb} – Densidade Aparente do Corpo-de-Prova

G_{mm} – Densidade Máxima Teórica da Mistura Asfáltica

IDF – Intensidade-duração-frequência

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

K – Coeficiente de permeabilidade

LEED – Leadership in Energy and Environmental Design

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

OGFC – Open Graded Friction Course

PEMs – Porous European Mixes

PVC – Policloreto de polivinila

RBV – Relação Betume Vazio

RT – Resistência à tração por compressão diametral

SBS – Estireno-Butadieno-Estireno

SIURB – Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras

SMA – Matriz Asfáltica Pétreá

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

VAM – Vazios do Agregado Mineral

Vv – Volume de Vazios

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Tipos de Pavimentos Asfálticos	14
2.2	Principais Defeitos em Pavimentos Asfálticos	16
2.3	Camada Porosa de Atrito	17
2.3.1	Características dos Materiais para Misturas Asfálticas Porosas	18
2.3.2	Dosagem das Misturas Asfálticas Porosas	19
2.3.3	Aspectos Funcionais	20
2.3.3.1	Atrito Pneus Pavimento	23
2.3.3.2	Redução de Ruído e aumento da visibilidade	23
2.3.4	As Características de permeabilidade e de Colmatação	24
2.4	CPA e os Aspectos Ambientais.....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	Método Experimental	28
3.1.1	Caracterização do Local de Estudo.....	28
3.1.2	Estrutura do método Experimental	30
3.2	Coleta e Caracterização dos Materiais	32
3.2.1	Ligante.....	32
3.2.2	Fibra.....	34
3.2.3	Agregados e sua caracterização	34
3.2.3.1	Absorção e Massa específica do agregado graúdo.....	35
3.2.3.2	Índice de Forma	37
3.2.3.3	Abrasão Los Angeles	39
3.2.3.4	Equivalente de Areia	41
3.2.4	Análise Granulométrica	43
3.2.5	Definição da Faixa Granulométrica	45
3.2.6	Dosagem da Mistura Asfáltica Porosa	47
3.2.6.1	Ensaio de Compactação Marshall	47
3.2.6.2	Parâmetros Volumétricos	49
3.2.6.2.1	Densidade máxima teórica da mistura – gmm.....	49
3.2.6.2.2	Densidade aparente do corpo-de-prova – gmb	51
3.2.6.2.3	Volume de vazios do corpo-de-prova – vv	52

3.2.6.3	Perda de massa por abrasão cântabro.....	53
3.2.6.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	54
3.2.6.5	Ensaio de Permeabilidade	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	Propriedades volumétricas.....	56
4.2	Comportamento mecânico	58
4.3	Teor de asfalto de projeto	59
4.4	Propriedades hidráulicas	61
5	DIMENSIONAMENTO E PROJETO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO	63
5.1	Tipo de Pavimento.....	63
5.2	Dimensionamento hidráulico do reservatório.....	64
5.2.1	Determinação da chuva de projeto.....	64
5.2.2	Determinação da porosidade n	65
5.2.3	Determinação da profundidade do reservatório	66
5.3	Dimensionamento mecânico.....	67
5.3.1	Estudo de Tráfego e Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	67
5.3.2	Determinação da espessura total do pavimento	68
5.3.3	Avaliação da espessura do revestimento.....	69
5.3.4	Determinação da espessura mínima das camadas granulares.....	69
5.4	Configuração final do pavimento.....	71
5.5	Previsão de reserva e dimensionamento do reservatório.....	73
6	CONCLUSÕES.....	74
	REFERÊNCIAS	76
	ANEXO A	82

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização está diretamente ligado com a impermeabilização do solo. As áreas permeáveis existentes não são suficientes para promover uma infiltração eficiente da água pluvial chegando a causar inundações como é presenciado em períodos de chuva. Casas, calçadas, arruamento, estacionamentos contribuem ainda mais para aumentar os índices de impermeabilidade do solo.

O problema também pode se estender devido a sistemas de drenagens insuficientes ou até acúmulo de lixos nas bocas de lobo impedindo o fluxo de água ao seu destino final. A ocorrência de inundações está ligada também a proliferação de doenças de veiculação hídrica como sarampo e leptospirose por exemplo devendo, portanto, realizar medidas para solucionar o problema de impermeabilização.

Em Uberlândia, a Lei Municipal Complementar nº 525, de 14 de abril de 2011 dispõe que deverão ser preservadas no mínimo 20% de área permeável em relação a área construída. Assim, a lei obriga a retenção de percentual de escoamento antes de lançá-lo ao sistema de drenagem. Porém, é sabido que após a liberação do imóvel, principalmente em casas e edifícios, essa área permeável vem a se tornar nula pois a mesma acaba sendo concretada, destinada a estacionamento ou outro fim que não seja a permeabilidade tornando-se um problema pois a água que deveria ser infiltrada no solo, acaba direcionada ao sistema de drenagem sobrecarregando-o e gerando enormes prejuízos.

Novos conceitos devem ser aplicados a fim de diminuir o problema de impermeabilização ao invés de transferi-lo para os sistemas de drenagem resolvendo parte do problema. A utilização do pavimento permeável permite diminuir o volume de escoamento superficial reduzindo os picos de cheia permitindo também realizar a captação dessa água que poderá ser infiltrada no solo reabastecendo o lençol freático ou conduzida para um reservatório para seu aproveitamento.

O pavimento permeável é composto por revestimento, base e sub-base de granulometria aberta com poucos finos permitindo a percolação e reserva da água pluvial assim, é necessário realizar, além do dimensionamento mecânico que envolve volume de tráfego, tipo de carregamento entre outros, o hidráulico pois é por ele que irá determinar a espessura da camada com capacidade de reserva atendendo tanto o sistema de transporte quanto ao hidráulico.

1.1 Objetivo

Devido ao escasso uso de pavimento permeável no Brasil, este trabalho procura contribuir e incentivar novas aplicações desse pavimento propondo o estudo da dosagem da mistura asfáltica e o dimensionamento do pavimento, com uma sugestão de implantação em uma área de estacionamento funcionando como um mecanismo de controle de escoamento e coleta de água contribuindo para sustentabilidade do sistema.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pavimentação (LABPav) da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, sendo realizados ensaios de caracterização do material de composição do pavimento, determinação de parâmetros mecânicos, volumétricos e hidráulicos a fim de dimensionar um estacionamento de pavimento permeável e realizar a coleta da água pluvial para uso de jardinagem no campus.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos de Pavimentos Asfálticos

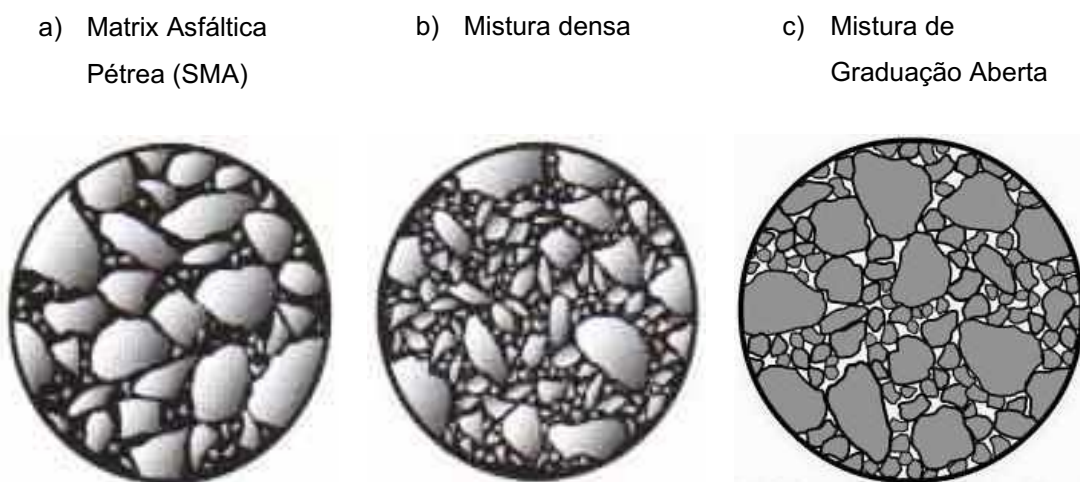
A necessidade de se obter um pavimento adequado em qualquer época do ano levou a busca por revestir o leito carroçável. Utilizando revestimentos de pedras conseguia-se a estabilização da estrutura e a camada superficial em concreto asfáltico ou concreto de cimento Portland forneciam condições de rolamento aos usuários, além de contribuírem para a capacidade estrutural do conjunto.

De acordo com Medina (1997), a partir do final da Segunda Guerra Mundial, com o preço dos derivados do petróleo mais baixos, houve um maior desenvolvimento

na tecnologia de pavimentos flexíveis à base de produtos betuminosos com relação aos pavimentos rígidos.

Existem no mercado tipos de misturas asfálticas de variadas proporções e características apresentando propriedades mecânicas e volumétricas adequadas para cada uso. O guia “HMA Pavement Mix Type Selection” discorre sobre três misturas asfálticas diferentes, a mistura densa, o *Stone Matrix Asphalt* (SMA) e as misturas de graduação aberta, conforme mostrado na Figura 1. A primeira possui distribuição granulométrica bem-graduada, relativamente impermeável e muito usada para todas as condições de tráfego, o SMA é composto por graduação descontínua, resistente a deformações permanentes, desgaste, utilizada em tráfego de alto volume de carga e em sua matriz pétrea inclui uso de fibras. Já as misturas de graduação aberta são permeáveis, apresentando graduação aberta e devem incluir o uso de fibras e ligantes modificados. As misturas asfálticas abertas são mais utilizadas para tráfegos baixo e médio com altas velocidades.

Figura 1 - Exemplo do esqueleto pétreo de algumas misturas asfálticas



Fonte: Highway Specialty Roading Products, (2016) e Pavement Interactive (2011)

As obras de pavimentação normalmente procuram conferir à estrutura máxima impermeabilidade, ou seja, impedir que a umidade do solo propicie a redução da capacidade de carga à compressão e do comportamento físico das camadas de suporte podendo causar a degradação da estrutura como abertura de trincas

entre outras patologias típicas de infiltração de água em pavimentos rodoviários. As misturas asfálticas permeáveis apresentam estrutura similar a convencional, sendo composta de brita e ligante, e o número de vazios é fator importante (VIRGILIIS, 2009).

2.2 Principais Defeitos em Pavimentos Asfálticos

O pavimento é constituído a fim de suportar tensões e distribuir as solicitações de maneira a evitar deformações excessivas, garantindo desempenho adequado da via. No entanto, o aumento do volume de veículos e excesso de carga provocam danos estruturais e superficiais no pavimento e o clima contribui ainda mais para a deterioração (BERNUCCI *et al*, 2008).

Os defeitos comumente identificados nas superfícies de pavimentos flexíveis são classificados, segundo normatização 005/2003-TER (2003) do DNIT, em: fendas (fissuras e trincas), trincas isoladas (transversais, longitudinais e de retração), trincas interligadas (tipo “couro de jacaré” e do tipo “bloco”), afundamento (plástico ou de consolidação), ondulação ou corrugação, escorregamento, exsudação, desgaste, panela ou buraco e remendo.

Em se tratando de pavimentos permeáveis, Schueler *et al.* (1987) afirma que um dos principais defeitos que afetam a durabilidade desse pavimento é a deformação pois a granulometria dos agregados afeta diretamente o desempenho das misturas. A deficiência na adesão entre agregado e ligante também é fator contribuinte para o surgimento de alguns defeitos como deformação permanente e fadiga (CHENG *et al.*, 2002).

Devido à graduação aberta proporcionar um elevado volume de vazios, misturas asfálticas permeáveis estão sujeitas a maior oxidação se comparada às convencionais. Assim o ligante com adição de polímero melhora a proteção a esse tipo de degradação e promove maior resistência à deformação permanente e à desagregação da mistura (HUBER, 2000).

Com relação às correções de defeitos em pavimentos permeáveis, Virgiliis (2009) sugere que em área com degradações menores que 0,5 m² (ex.: panelas) pode ser utilizada misturas asfálticas convencionais, pois não ocorre prejuízo ao

pavimento como um todo. Para defeitos que atingem maiores áreas, faz-se necessário a utilização de misturas com características drenantes em sua composição. A reabilitação dos pavimentos drenantes pode ser realizada pela utilização de fresagem e substituição da camada porosa por uma nova camada drenante ou, ainda, impermeabilizar a camada antiga e adicionar uma nova camada porosa.

2.3 Camada Poroza de Atrito

Segundo o ES 386/99 do DNER, a camada porosa de atrito (CPA) é uma mistura asfáltica usinada composta de agregados, material de enchimento (fíler) e cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero espalhada e compactada a quente com porcentagem de volume de vazios de 18 a 25%. Para Ferguson (2005), a utilização de polímeros aumenta a vida útil média em torno de 7 a 11 anos do CPA quando aplicado como camada de rolamento de rodovias.

Nos Estados Unidos, o pavimento permeável é conhecido como “*open graded friction course (OGFC)*” e deve apresentar volume de vazios de 15%. Na Europa, a denominação para uma mistura asfáltica permeável é “*Porous European Mixes (PEMs)*” e deve incluir ligantes asfáltico modificados com polímeros e apresentar volume de vazios de 18 a 22% (HUBER, 2000).

Holtz (2011) afirma que a água pluvial pode infiltrar diretamente no solo e consequentemente diminuir a vazão que chega no sistema de drenagem sendo, portanto, uma alternativa limpa de reverter o impacto ambiental gerado pela impermeabilização urbana. Contudo, segundo Bernucci *et al.*, (2008), em uma estrutura de pavimento revestido com CPA, a camada imediatamente inferior ao CPA deve ser obrigatoriamente impermeável para evitar a entrada de água no interior da estrutura e também o contato com o solo.

Ainda segundo Ferguson (2005), o pavimento poroso pode promover a infiltração das águas pluviais no solo, reabastecer as águas subterrâneas, diminuir as ilhas de calor, reduzir o escoamento das águas pluviais causadoras das inundações além de permitir que as raízes das árvores respirem. Isso torna o pavimento

poroso uma tecnologia com potencial para revolucionar o gerenciamento de águas pluviais futuramente.

O revestimento asfáltico do tipo CPA sozinho não contribui para um efetivo sistema drenante, mas se combinado a uma base e sub-base porosa como a brita graduada simples (BGS) promove uma eficiente reserva de águas pluviais temporária (VIRGILLIS, 2009), podendo essa reserva ser direcionada à coleta e reaproveitamento ou a própria infiltração pelo solo do subleito até o lençol freático, evitando assim enchentes e inundações.

Segundo Azzout *et al.* (1994), a água pluvial infiltra no pavimento permeável através dos poros (forma distribuída), é armazenada dentro dos vazios do pavimento temporariamente e é drenada por rede até local de coleta e armazenamento em tanques ou para infiltração no solo.

2.3.1 Características dos Materiais para Misturas Asfálticas Porosas

O agregado utilizado na camada porosa de atrito precisa resistir ao atrito interno entre as partículas, possuir índice de abrasão Los Angeles igual ou inferior a 30% (NBR 051), índice de forma superior a 0,5 (NBR 6954) e em relação à durabilidade, perda inferior a 12% (DNER-ME 089). Segundo Virgillis (2009) o agregado pode ser qualquer material incluindo cascalho, pedregulho, pedra britada, resíduos de construção civil dentre outros. A faixa granulométrica da mistura deve permitir um maior teor de vazios sendo, portanto, utilizada granulometria aberta e com poucas partículas finas. Vale ressaltar que para a utilização de resíduos de construção como agregado, deve ser avaliada sua resistência pois esses são materiais que irão sofrer alta degradação granulométrica pela ação do tráfego.

Já em relação aos ligantes, Gonçalves *et al.* (2000) afirma que deve ser utilizado o modificado por polímero proporcionando rigidez à altas temperaturas e flexibilidade em baixas temperaturas, conferindo uma maior resistência à oxidação e proporciona uma ligação mais forte entre os agregados. Com a utilização de ligante convencional, Virgillis (2009) discorre que a probabilidade da ocorrência de desagregação de partículas, a ocorrência de trincas é maior. O

pavimento asfáltico poroso também pode sofrer colmatção devido ao próprio ligante. Quando o ligante é muito fluido ou a sua união com o agregado é fraca, o ligante pode escorrer através dos poros gradualmente e se acumular no interior da estrutura assim nota-se a necessidade de desenvolvimento de tecnologias a fim de estabilizar o ligante betuminoso (VIRGILIIS, 2009).

O uso de fibras de celulose adicionadas à mistura asfáltica na ordem de 0,3 a 0,5% em relação a massa da mistura contribui para evitar o escorrimento do ligante permitindo o uso de um valor maior de teor de ligante em misturas na qual sem seu uso poderia causar a colmatção (DECOENE, 1990). A determinação da porcentagem de fibra a utilizar baseia-se no método Schellemborg que consiste em pesar 1000g da mistura asfáltica em um béquer, leva-lo à estufa na temperatura de compactação por $1\text{ h} \pm 1\text{ min}$, remover o conteúdo do béquer e pesar novamente calculando a massa de ligante presa na superfície. A porcentagem encontrada deve ser menor ou igual 0,3% e desejáveis valores menores que 0,2% (BERNUCCI et al., 2008).

2.3.2 Dosagem das Misturas Asfálticas Porosas

Em São Paulo, foi aprovada em 2012, pela comissão permanente de revisão de normas técnicas da Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras (Siurb) a norma ETS-03/2012 que estabelece um padrão para dimensionamento, execução e cálculo hidráulico de pavimentos permeáveis. Em 2015, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a Norma Técnica ABNT NBR 16416:2015 estabelecendo os requisitos mínimos de projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto.

Para se determinar o teor de ligante de projeto da mistura asfáltica, são utilizados parâmetros como a energia de compactação, a temperatura de trabalho, o tipo de mistura entre outros. O método mais comumente utilizado e que já passou por várias alterações ao longo dos anos é denominado Marshall no qual recomenda esforços de compactação de 50 golpes para uma pressão de pneu de até 7 kgf/cm^2 ou 75 golpes com pressão de pneu entre 7 kgf/cm^2 e 14 kgf/cm^2 . (BERNUCCI et al., 2008).

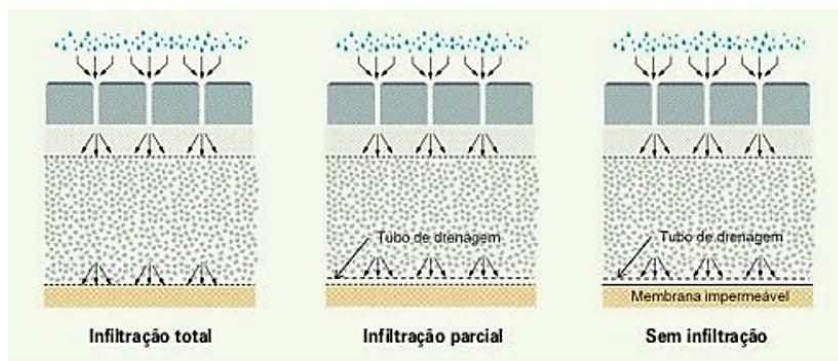
A dosagem Superpave possui outra metodologia na determinação do teor de projeto no qual os pesquisadores buscavam obter uma maior aproximação de compactação dos corpos-de-prova em laboratório com a realizada em campo. A maior diferença entre o método Superpave e o Marshall é relacionada a compactação, a primeira é realizada por amassamento (giros) já a segunda por golpes (PRUDENTE, 2015).

O uso de diferentes procedimentos de dosagem pode gerar teores de projetos distintos assim, a escolha do método é de fundamental importância para o desempenho da camada. Além disso, a compactação realizada de modo distinto, mas que apresente a mesma volumetria, dependendo da amostra e seus constituintes, pode apresentar um comportamento mecânico diferente (LEANDRO, 2016).

2.3.3 Aspectos Funcionais

Existem três sistemas diferentes de infiltração de água pelo pavimento permeável como mostrado na Figura 2. A escolha do sistema depende do grau de permeabilidade do solo e do risco de contaminação: o sistema sem infiltração faz-se necessário quando a permeabilidade do solo é baixa ou há riscos de contaminação, assim utiliza-se uma membrana impermeável e essa água infiltrada é direcionada para um tubo de drenagem. No sistema de infiltração parcial, parte da água é infiltrada pelo solo e o excedente drenado por tubos que complementam o processo. Já no sistema de infiltração total, toda a água é infiltrada pelo solo que deve ter capacidade de receber esta água (ABCP, 2010).

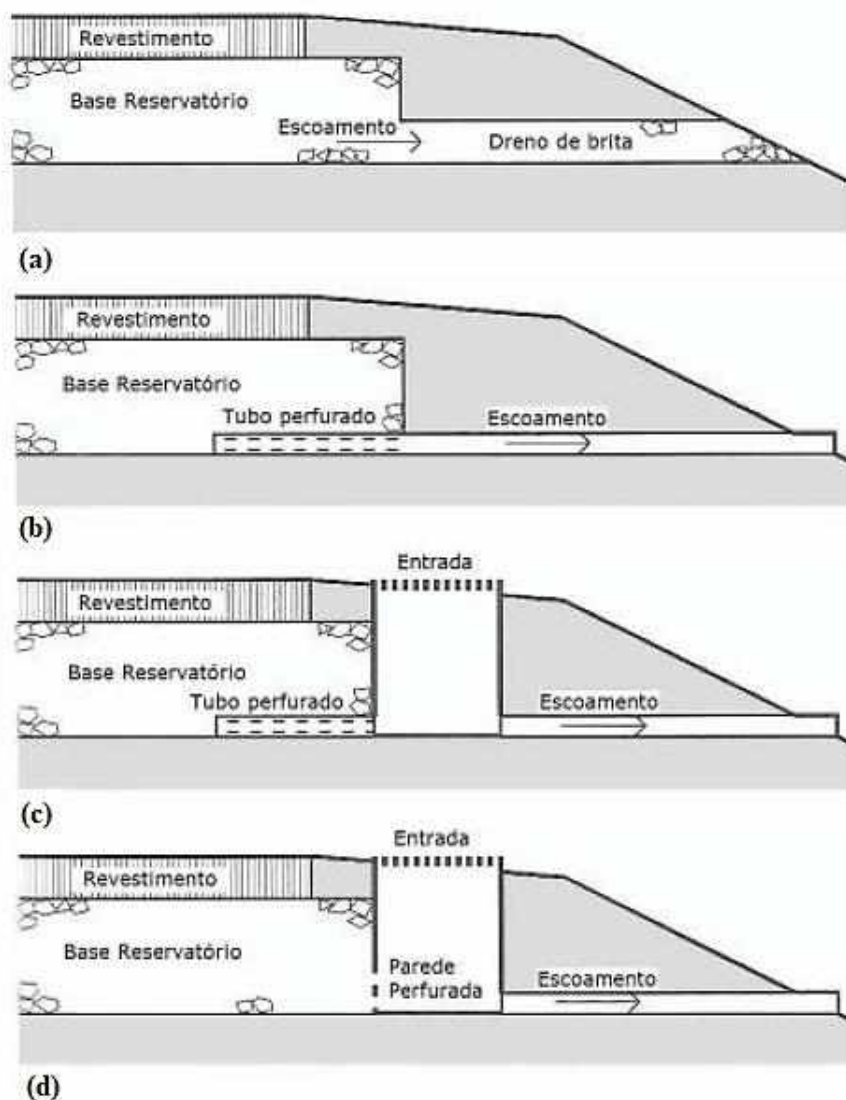
Figura 2 - Diferentes sistemas de infiltração em pavimentos permeáveis



Fonte: ABCP, 2010

Em casos de utilização de reservatórios sem infiltração pelo solo, alguns modelos de dispositivos são possíveis para saída da água na parte inferior como apresentado na Figura 3. Os drenos permitem que a água seja escoada impedindo assim sua infiltração no subleito e podem ser captadas por drenos granulares (Figura 3 (a)), tubos perfurados (Figura 3 (b)) e utilização ou não de estruturas que permitam o monitoramento ou manutenção (Figura (c) e (d)) (VIRGILIIS, 2009).

Figura 3 - Exemplos de dispositivos de descarga lateral localizados na parte inferior do Reservatório de Base



Fonte: Fergunson, 2005

Em fase de projeto, deve-se realizar uma avaliação do local onde será implantado esse tipo de pavimento, determinando a área de contribuição e sua taxa de impermeabilização para calcular o volume de água que possa ser armazenada na estrutura do pavimento. Além da estrutura, deve-se avaliar a qualidade da água com relação a presença de contaminantes e quantidade de finos existentes que possam prejudicar na eficiência do pavimento entupindo os poros (Azzout *et al.*, 1994).

O revestimento do tipo CPA, quando não combinado a um sistema drenante, pode ser aplicado sobre uma camada de revestimento impermeável, onde a água apenas infiltra pela sobrecamada porosa, não promovendo a sua reserva. A Figura 4 apresenta a seção de um pavimento com revestimento de material poroso como medida mitigadora do efeito da aquaplanagem provocados por veículos em dias chuvosos (Virgiliis, 2009).

Figura 4 - Sobrecamada de material poroso sob revestimento convencional



Fonte: Virgiliis, 2009

Vários países têm utilizado pavimento permeável no auxílio da drenagem trazendo além disso, mais segurança para o usuário pois a utilização desse tipo de pavimento minimiza o efeito spray, a aquaplanagem, e as poças de água em dias chuvosos (ACIOLI, 2005). A Figura 5 ilustra a implantação de pavimento permeável em São Paulo com o objetivo de diminuir a incidência de enchentes.

Figura 5 - Implementação de pavimento permeável na cidade de São Paulo



Fonte: Prefeitura de São Paulo

2.3.3.1 Atrito Pneu Pavimento

O atrito pneu pavimento tem relação importante com a segurança nas rodovias. A redução do atrito em dias de chuva pode aumentar o potencial de acidentes e quanto maior a velocidade, menor é será o atrito. Um estudo realizado na França entre 1979 e 1985 em um trecho da rodovia, apresentou 52 acidentes e após a aplicação do OGFC datado em 1985 a 1989 não ocorreram acidentes (CHAIGNON, 1993).

Uma das vantagens de se utilizar a camada porosa de atrito é a obtenção de uma macrotextura que permite uma maior resistência à derrapagem com o pavimento molhado em dias de chuva anulando a fina camada de água que se forma em pavimentos convencionais. Assim, essa característica mantém uma alta aderência entre o pneu e o pavimento principalmente em altas velocidades (CASTRO, 2005).

2.3.3.2 Redução de Ruído e aumento da visibilidade

O tipo de graduação aberta permite uma textura diferente dos pavimentos convencionais encontrados e isso contribui na absorção do ruído indesejado e aumento da visibilidade dos condutores nas estradas (PUTMAN, 2012). Com a eliminação da película de água que se forma em dias chuvosos, o fenômeno da reflexão de luzes (CASTRO, 2005).

2.3.4 As Características de permeabilidade e de Colmatção

A notória característica da camada porosa de atrito é sua permeabilidade. Tucci (2000), em seu estudo sobre coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas, apresentam os coeficientes de escoamento superficial em que o valor de 0,95 retrata a superfície de concreto asfáltico denso, enquanto que o concreto asfáltico poroso apresenta valor de 0,03. A Tabela 1 mostra os valores de coeficiente de escoamento superficial obtidos por Tucci (2000).

Tabela 1 - Valores de coeficiente de escoamento superficial para algumas superfícies

Tipo de superfície	Valor médio	C _i
Cimento e Asfalto	0,95	0,90 – 0,95
Paralelepípedo	0,60	0,58 – 0,81
Blockets	0,78	0,70 – 0,89
Concreto asfáltico poroso	0,03	0,05
Solo compactado	0,66	0,59 – 0,79

Fonte: Tucci, 2000

Em períodos de chuvas, Watanabe (1995) notou que com a utilização de pavimento permeável, houve uma redução na vazão de pico de 15 a 20%. Segundo Azzout et al. (1994), a porosidade útil ideal para esse tipo de pavimento deve variar entre 18 a 22%, e a permeabilidade entre 0,8 e 1,8 cm/s.

Para se obter um eficiente sistema de infiltração é necessário que o solo tenha algumas características que devem ser consideradas como: i) taxa de infiltração do solo saturado em casos de pavimentos que sugerem a infiltração da água no solo; ii) capacidade de carga e iii) o comportamento do solo na presença de água para evitar contaminação do lençol freático e prever riscos de perda de capacidade de carga (Azzout *et al.* 1994).

Pelo fato do pavimento permeável apresentar elevado porcentagem de vazios em relação às misturas asfálticas tradicionais, a probabilidade de ocorrer o entupimento ou a chamada colmatção é significativa podendo comprometer a capacidade de condutividade hidráulica com o tempo e sua vida útil. Schueler (1987) afirma que não realizar a correta limpeza desse pavimento pode levar a sua inutilização em poucos meses e ainda segundo Putman (2012), esse

problema pode ser reduzido com sua utilização em rodovias de alta velocidade pois gera uma sucção eliminando as partículas finas que entopem os poros.

A vegetação no entorno onde será implantado o pavimento permeável deve ser notada, pois terrenos descobertos podem levar o carreamento de solo e até mesmo folhas para o pavimento podendo assim entupir os poros causando a colmatção. O ideal seria isolar o solo do pavimento com a utilização de canaletas, por exemplo (Azzout *et al.* 1994). Em locais com grandes taxas de erosão em decorrência dos ventos, também pode contribuir para o entupimento dos poros devido ao acúmulo de sedimentos (Bianchet, 2015).

O procedimento para a descolmatção é realizado pelo uso de vassouras a seco ou úmida sem pressão com posterior secagem da parte superior da superfície e aplicação de jatos d'água de acordo com revestimento e aspiração. Como qualquer tipo de revestimento, o pavimento permeável requer manutenção, que neste caso, para prevenção da colmatção, exige-se uma periodicidade que varia para cada autor. De acordo com Azzout *et al.* (1994) esse tempo é em torno de 6 meses a 2 anos, para Pariat (1992) de 4 a 5 meses e Diniz (1980) afirma que a manutenção deve ser efetuada quatro vezes ao ano.

2.4 CPA e os Aspectos Ambientais

Segundo Baptista e Nascimento (2005), a drenagem urbana pode ser abordada em dois sistemas: o clássico e o técnico alternativo. A primeira abordagem indica que a drenagem pluvial deve ser rápida e direcionada por meio de condutos subterrâneos composta por transporte pelas sarjetas, captação por bocas de lobo e por fim deságue favorecidos pelas galerias. Já a segunda abordagem leva em consideração o impacto da urbanização e busca alternativas a esse efeito pela implantação de estruturas de armazenamento temporário, pavimentos permeáveis e canalizações em cursos d'água com técnicas que favoreçam o escoamento lento.

De acordo com Wang *et al.* (2010) a crescente população acarretou em aumento da superfície impermeável nas cidades provocando alterações no escoamento superficial e a diminuição da percolação efetiva de água pluvial no solo. Além

disso, segundo o autor, a quantidade de áreas pavimentadas juntamente com a alta densidade de edifícios, redução do número de árvores entre outros fatores, constituem a principal causa do efeito denominado de ilha de calor. Isso se deve ao fato de o concreto e o asfalto apresentarem maior condutividade térmica e propriedades radioativas superficiais que resultam em temperaturas mais elevadas. A superfície pavimentada também suprime a evapotranspiração da umidade que faz com que a temperatura também se eleve nos centros urbanos.

Canholi (2005) afirma que o problema de inundações urbanas está ligado diretamente a impermeabilização dos solos, sistemas de drenagens ineficientes ou gerência inadequada e até inexistência desse sistema em municípios e acúmulo de lixos nas bocas de lobo. De acordo com Pedrosa (1996), epidemias e algumas moléstias são de veiculação hídrica como sarampo e leptospirose. Assim, as inundações contribuem para a proliferação de doenças.

Tucci (2000), em seu estudo sobre o coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas, afirma que a cada aumento de 10% de área impermeável, aumenta cerca de 100% no coeficiente de escoamento de cheia e superficial. Conclui ainda que para cada habitante aumenta-se em 49 m² a área impermeável. O arruamento representa um aumento no volume de escoamento cerca de 260%.

A implementação de pavimentos permeáveis contribui para o desenvolvimento sustentável pois incorpora tecnologia e conceitos de qualidade ambiental visando manter o controle do escoamento superficial causados pela impermeabilização vinda do processo de urbanização. Esse tipo de pavimento pode também atuar como reservatório de retenção, armazenando a água pluvial escoada superficialmente, ou de infiltração, sendo absorvido pelo solo reabastecendo o lençol freático. (VIRGILIIS, 2009).

Em pavimentos com função de reservatório onde há a saída de água por exultório, existem estudos que sugerem o reaproveitamento dessa água para fins não potáveis, ao invés de direcioná-la à rede de drenagem (Pratt, 1999). Colandini (1999) analisou uma estrutura de pavimento permeável numa área residencial em Rezé, na França, e observou que a maior parte de poluentes

como chumbo, zinco e cádmio ficou retida na seção porosa do pavimento. Kwiatkowski et al. (2007) realizou uma análise no campus da universidade de Villanova, na Pensilvânia, sobre a capacidade de infiltração e tratamento de poluentes em concreto permeável e constataram que os poluentes presentes nas águas de chuva não afetam os lençóis subterrâneos.

Segundo Huffman (2005), em áreas de pátios de grandes empresas, por exemplo, os custos de construção de sistemas de coletas e tratamentos das águas pluviais poderiam ser revertidos na construção do concreto permeável e a filtragem das águas que passam pelo pavimento podem auxiliar no tratamento das águas reabastecendo o lençol freático.

O pavimento permeável pode contribuir para a qualidade da água de infiltração. Um estudo realizado na França analisou a concentração de poluentes em pavimentos permeáveis e pode-se notar que houve retenção de poluentes melhorando assim a qualidade de água seja ela passante ou não. A Tabela 2 apresenta o percentual de redução da concentração de poluentes em pavimentos permeáveis.

Tabela 2 - Redução da concentração de poluentes em pavimentos permeáveis

Local	Características	Diminuição da poluição em concentração (%)				
		MS	DQO	Pb	Zn	DBO
Rue de la classerie em Rezé (Nantes)	Asfalto poroso + reservatório de britas	61		81	67	-
Pare d'échange de Caillou (Bordeaux)	Asfalto poroso + concreto poroso (base)	36	79	86	-	-
ZAC de Verneuil (Paris) Zona I	Asfalto poroso + reservatório de britas	81	63	76	35	45
Zona II	Asfalto convencional + reservatório de britas	68	58	77	45	39
Zona III	Vários tipos de estruturas	1	14	50	16	7

Legenda: MS = Matéria em suspensão; DQO = Demanda química de oxigênio; DBO = Demanda bioquímica de oxigênio. Fonte: Adaptado de Rimbault et al. 2002

Com o uso do pavimento permeável, Holtz (2011) afirma que seu valor econômico aumenta, pois apesar de seu alto investimento, seu uso pode ser implementado ao sistema de tratamento de águas pluviais, drenagem, evita a necessidade de uso de poços de retenção, encanamento dentre outros sistemas de drenagem além de reduzir ou até mesmo dispensar o sistema de irrigação e contribuir para o reabastecimento hídrico.

O pavimento permeável também pode auxiliar no processo de classificação para créditos LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) que avalia o desempenho ambiental de edificações através de desenvolvimento sustentável, poupança de água, eficiência energética, seleção de materiais e qualidade do ambiente interno, assim, o concreto permeável pode se enquadrar em várias categorias incluindo locais sustentáveis, eficiência de água e recursos e inovação de design (ASHLEY, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos realizados a fim de se avaliar as propriedades de uma mistura asfáltica porosa. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LABPav), Laboratório de Materiais de Construção Civil (LABMat) e Laboratório de Estruturas, localizada na Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da UFU. Também apresenta o projeto e dimensionamento da estrutura do pavimento estudado em questão, para uma área de estacionamento no campus Santa Mônica.

3.1 Método Experimental

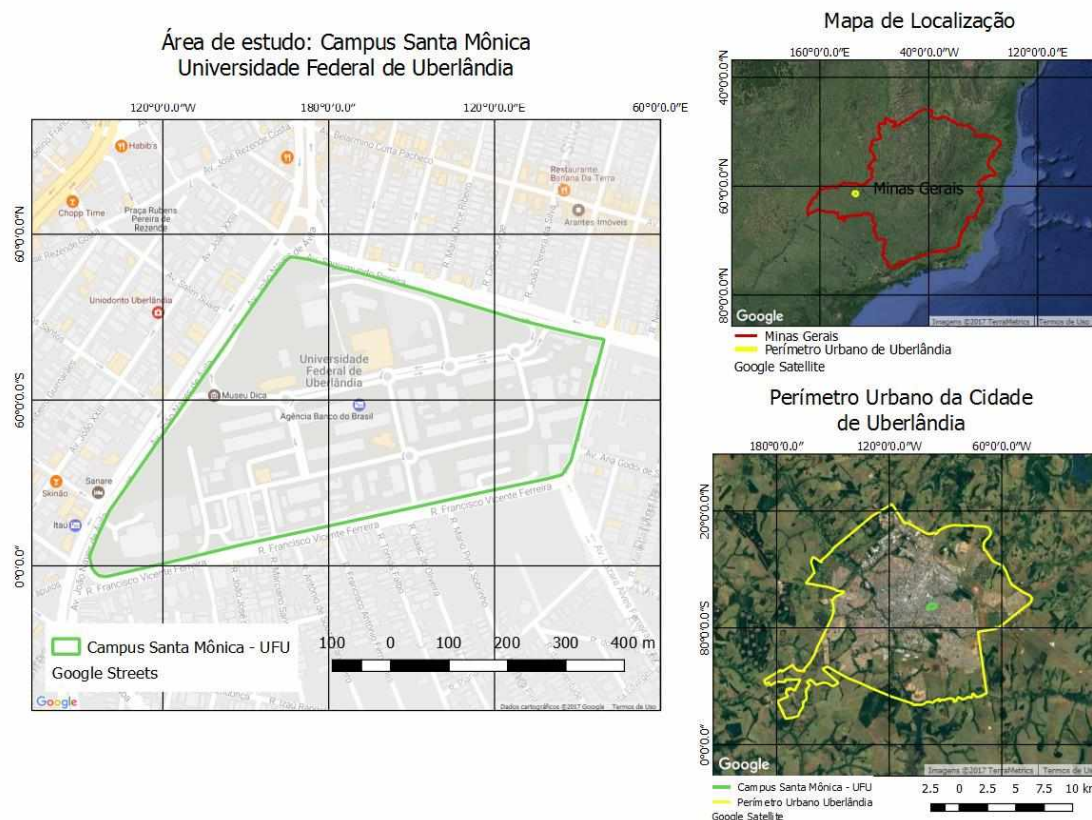
O método para realização desse estudo baseia-se em identificação do local de implantação da camada porosa de atrito, sua dosagem e dimensionamento de uma área para estacionamento.

3.1.1 Caracterização do Local de Estudo

O projeto para implantação do CPA foi realizado para seu uso na Universidade Federal de Uberlândia no Campus Santa Mônica na cidade de Uberlândia, Minas Gerais. A Figura 6 mostra o mapa de locação obtido através do programa Qgis.

A partir do projeto arquitetônico do Campus, temos uma área total de 265.625,27 m², dentre essa, uma área pavimentada de 44.197,38 m² e uma área permeável de 93.003,41 m².

Figura 6 - Mapa de definição do local de estudo



Fonte: Autor, 2017

Uma área de 3.657,43 m² dentro do Campus (Figuras 7 e 8) foi destinada para a implantação do pavimento permeável e para coleta da água pluvial, permitindo seu uso para irrigação de plantas do próprio campus. Sua utilização permite integração com o espaço urbano proporcionando um excelente escoamento superficial evitando poças, efeito spray, reaproveitamento da água e pode diminuir a carga de água nas redes de drenagem pluvial da região causadora de enchentes. O anexo A apresenta a identificação da área de estacionamento no Campus.

Figura 7 - Localização da área de estacionamento em estudo no Campus Santa Mônica



Fonte: Google Maps, (2017)

Figura 8 - Área de estacionamento retirada do projeto arquitetônico do campus

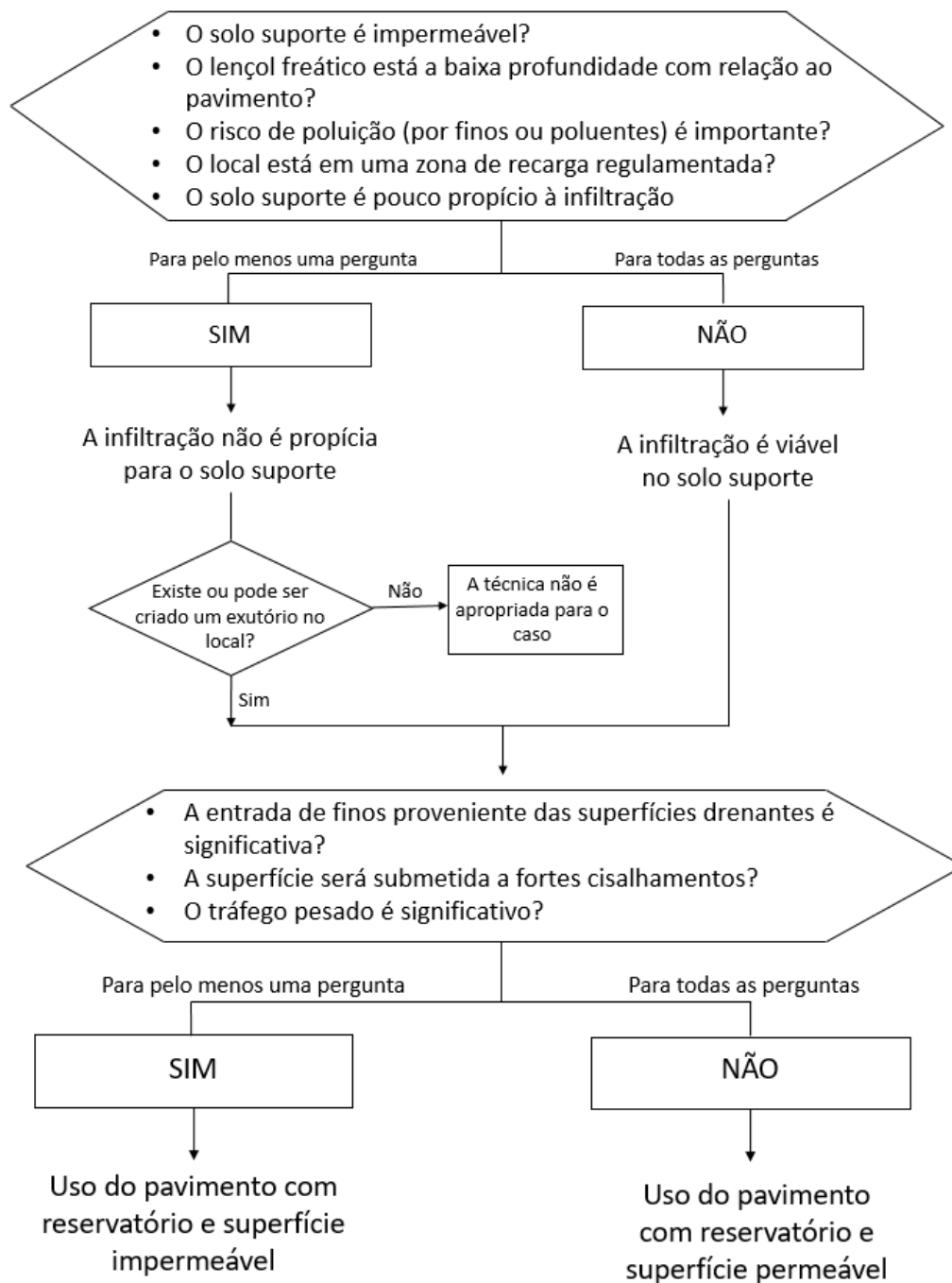


Fonte: UFU (2017)

3.1.2 Estrutura do método Experimental

Para se realizar esse projeto, faz-se necessário avaliar a sua viabilidade no local de implantação evitando e prevendo possíveis problemas construtivos e a proposta é viável para esse fim, contribuindo para a escolha do tipo de estrutura de reservatório que deva ser utilizada. Para isso, Acioli (2005) apresenta um fluxograma modelo (Figura 9) de análise de viabilidade de implantação de pavimento permeável a qual foi utilizada como base para esse trabalho.

Figura 9 - Fluxograma modelo de análise de viabilidade para implantação de pavimento permeável

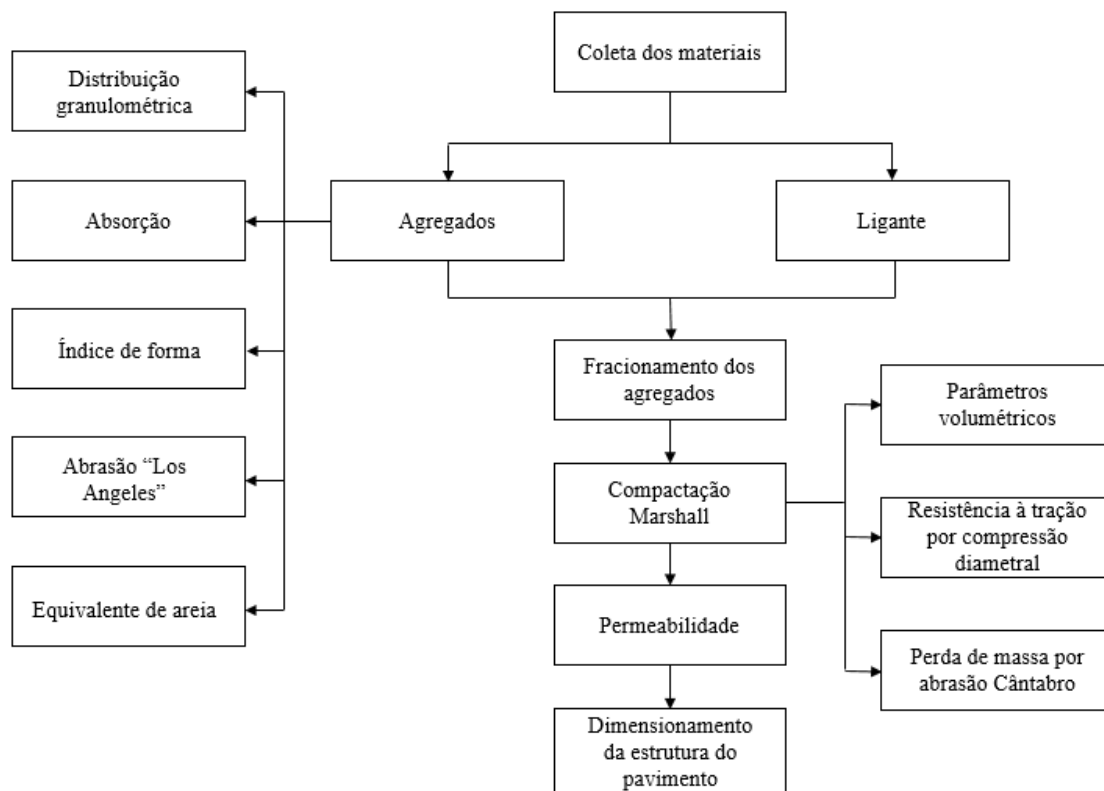


Fonte: Acioli (2005)

O estudo de viabilidade é de suma importância na escolha do tipo de pavimento pois é a etapa que define o sucesso de sua implantação, portanto um processo que não pode ser dispensado. Para o caso desse trabalho não se dispunha das informações das características do solo do Campus Santa Mônica, mas

considerou-se viável a implantação do uso do pavimento com reservatório e superfície permeável tendo em vista, principalmente, a característica do tráfego. A Figura 10 mostra o fluxograma do método experimental desse trabalho.

Figura 10 - Fluxograma do método experimentado utilizado no trabalho



Fonte: Autor, 2017

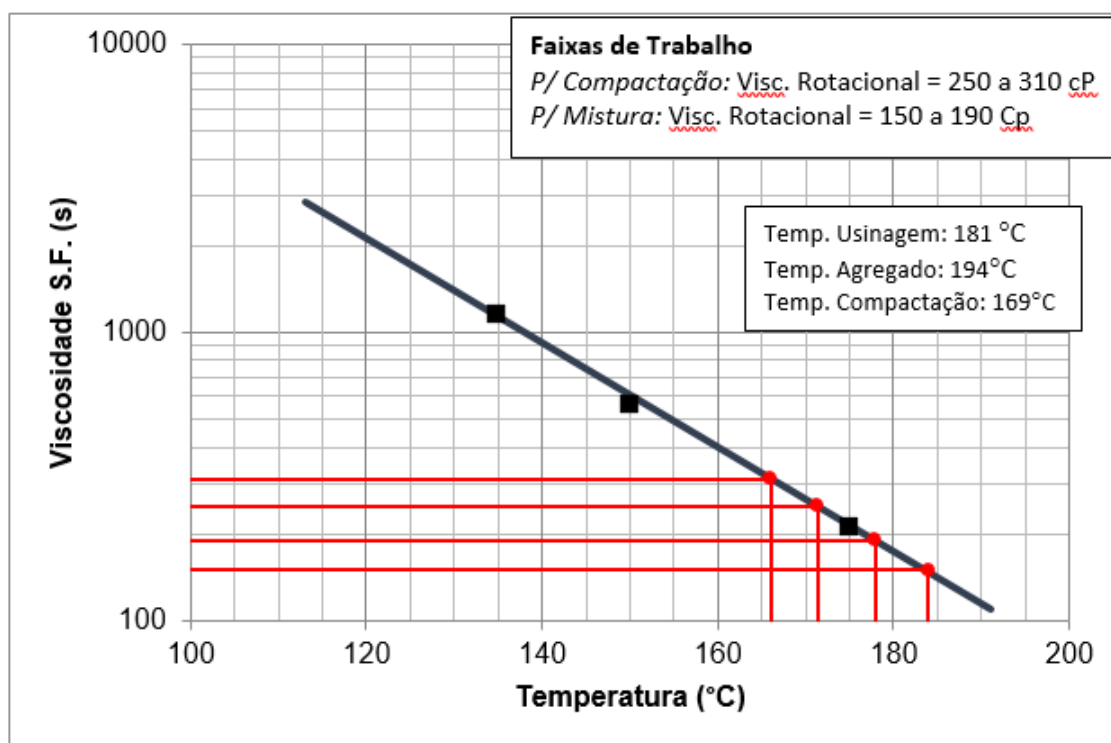
3.2 Coleta e Caracterização dos Materiais

A caracterização dos materiais utilizados nesse trabalho é apresentada nos próximos itens.

3.2.1 Ligante

O ligante asfáltico foi um modificado por polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) do tipo 65/90 e fornecido pela empresa Betunel. As temperaturas de trabalho para o ligante modificado se deram em função da curva viscosidade-temperatura da Figura 11 a partir das características do ligante, conforme consta a ficha técnica do ligante modificado SBS 65/90 (Tabela 3) relacionadas a viscosidade Brookfield para 135°, 150° e 175°C.

Figura 11 - Temperatura de trabalho do CAP modificado



Fonte: Autor, 2017

Tabela 3 - Característica do ligante modificado por SBS (Betunel indústria e comércio LTDA)

Ensaio	Ligante modificado SBS 65/90	
	Limites (ANP resolução Nº 32 de 2010)	Resultados
Penetração, 100g, 5s, 25°C, dmm	40 a 70	55
Rec. Elástica dutilômetro, 20cm, 25°C, %	90 min.	91
Ponto de amolecimento, °C	65 min.	70,5
Viscosidade Brookfield a 135°C, cP	3000 máx.	1140
Viscosidade Brookfield a 150°C, cP	2000 máx.	560
Viscosidade Brookfield a 175°C, cP	1000 máx.	211
Ponto de fulgor, °C	235 min.	> 235
Densidade relativa a 20/4 °C	NA / Anotar	1,011
Estabilidade na estocagem - DIF.P. AM., °C	5 máx.	2

3.2.2 Fibra

A fibra utilizada neste trabalho é composta de celulose e possui formato de micro grãos. Para sua utilização fez-se necessário “abrir” a fibra com o auxílio de uma energia de mistura, para isso foi utilizado um liquidificador transformando-a em partículas menores a ser adicionada à mistura. A porcentagem de fibra utilizada foi de 0,3% em relação à massa da mistura.

A sua utilização para esse trabalho foi opcional, a fim de evitar que o ligante escorresse e colmatasse os poros na compactação Marshall diminuindo assim a permeabilidade do corpo-de-prova.

3.2.3 Agregados e sua caracterização

Os agregados utilizados nos procedimentos são de origem basáltica e foram fornecidos pela empresa ECOBRIX localizada no município de Uberlândia (Figura 12). Inicialmente, fez-se a caracterização em laboratório dos materiais coletados os quais foram brita 1, brita 0, pedrisco e pó de pedra (os dois coletados misturados) cujas dimensões máximas característica dos agregados são respectivamente 19,0 mm, 12,7 mm e 4,8 mm.

Figura 12 - Empresa ECOBRIX onde foi realizada a coleta de agregado



A fim de se verificar as características dos agregados, fez-se necessário a realização de ensaios, estes realizados nos laboratórios de pavimentação, de materiais e de estruturas, da FECIV/UFU.

3.2.3.1 Absorção e Massa específica do agregado graúdo

Para realização do ensaio para determinação da massa específica e absorção de água do agregado graúdo, foi utilizada a norma da ABNT NBR NM 53:2009. Os materiais utilizados para o ensaio foram brita 1 e brita 0 retidos na peneira de 4,75 mm e a quantidade de acordo com Tabela 4, sendo a brita 1, de dimensão nominal de 19 mm com massa mínima a ser utilizada de 3 kg e brita 0 de dimensão nominal de 12,5 mm com massa mínima de 2 kg.

Tabela 4 - Massa mínima de amostra de ensaio

Dimensão máxima característica (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)	Dimensão máxima característica (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
12,5	2	75	18
19	3	90	25
25	4	100	40
37,5	5	112	50
50	8	125	75
63	12	150	125

Fonte: ABNT NBR NM 53:2009

O material retido na peneira foi lavado a fim de retirar todo o pó ou qualquer outro material que por ventura esteja retido na superfície do agregado. Esse material foi levado à estufa até constância de peso, retirado, deixado esfriar à temperatura ambiente para dar prosseguimento ao experimento.

O procedimento de ensaio consistiu na pesagem da amostra de acordo com a dimensão característica de cada material, submergir o agregado em água à temperatura ambiente por um período de (24 ± 4) h. Retirou-se da água e envolvendo-a em um pano úmido de forma tal que toda a água visível na superfície fosse absorvida, mas que ainda se apresentasse úmida. Pesou-se a

amostra de agregado saturado com superfície seca. Em seguida, colocou-se o agregado em um recipiente vazado, submergiu-a em água em temperatura $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e mensurou-se seu peso (massa em água). Levou-se a amostra à estufa e fez-se a pesagem do agregado seco. A massa específica aparente foi calculada pela equação (1) e a absorção de água pela equação (2).

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (1)$$

Em que,

d_a : é a massa específica aparente do agregado seco, expressa em (cm^3) ;

m : é a massa da amostra seca ao ar, expressa em gramas;

m_s : é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, expressa em gramas;

m_a : é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, expressa em gramas.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que,

A : é a absorção de água, expressa em porcentagem;

m_s : é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, expressa em gramas;

m : é a massa ar da amostra seca, expressa em gramas;

Os resultados dos ensaios de massa específica aparente e de absorção do agregado graúdo são apresentados na Tabela 5.

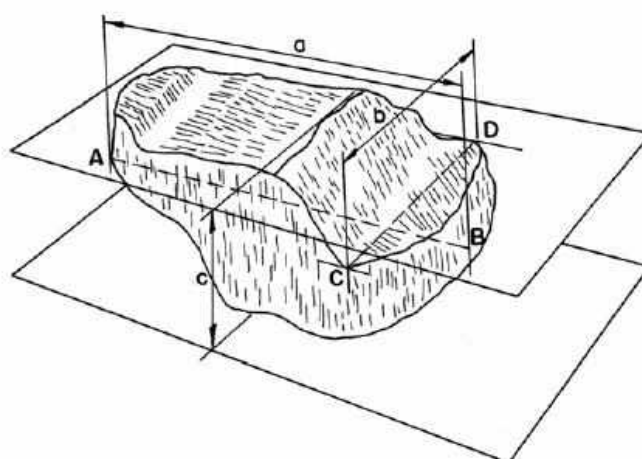
Tabela 5 - Resultado dos ensaios de Massa específica aparente e Absorção

Massa específica do agregado graúdo e Absorção		
	Brita 1	Brita 0
Massa seco ao ar (g)	3114,97	2037,97
Massa Superfície Saturada Seca (g)	3125,36	2047,94
Massa imerso (g)	2034,96	1333,9
Massa seco em estufa (g)	3087,4	2015,2
Massa esp. Aparente (cm³)	2,86	2,85
Absorção	0,33%	0,49%

3.2.3.2 Índice de Forma

Para a determinação do índice de forma do agregado foi utilizada a norma da ABNT NBR 6954:1989. Foram utilizados 25 fragmentos de agregado obtido de forma aleatória da brita 1 e da brita 0. Com uso de um paquímetro foram medidas as dimensões a, b e c de cada agregado em milímetros como apresenta a Figura 13. Por fim, foram realizadas as médias aritméticas para cada uma das relações b/a e c/b . O resultado das medidas apresentados na Tabela 6 classifica a forma do agregado em cúbica, alongada, lamelar e alongada-lamelar.

Figura 13 - Dimensões do agregado a serem medidas



Fonte: ABNT NBR 6954:1989

Tabela 6 - Resultado do ensaio de índice de forma

Índice de forma - Brita 1						Índice de forma - Brita 0					
Grão	Comp. (a)	Larg. (b)	Esp. (c)	b/a	c/b	Grão	Comp. (a)	Larg. (b)	Esp. (c)	b/a	c/b
1	22,91	12,40	11,89	0,54	0,96	1	14,62	9,70	6,58	0,66	0,68
2	23,72	11,62	9,29	0,49	0,80	2	10,54	9,28	9,20	0,88	0,99
3	18,92	14,12	4,49	0,75	0,32	3	9,04	5,85	3,04	0,65	0,52
4	26,17	13,88	7,53	0,53	0,54	4	13,59	9,82	6,61	0,72	0,67
5	31,11	20,18	11,57	0,65	0,57	5	14,97	7,93	4,37	0,53	0,55
6	28,89	21,63	15,16	0,75	0,70	6	15,22	12,34	4,08	0,81	0,33
7	17,33	13,27	9,70	0,77	0,73	7	12,04	7,22	5,21	0,60	0,72
8	20,46	18,01	15,67	0,88	0,87	8	13,95	9,15	7,29	0,66	0,80
9	23,48	16,31	11,07	0,69	0,68	9	13,49	7,32	13,16	0,54	1,80
10	19,75	19,15	11,81	0,97	0,62	10	15,86	12,42	4,60	0,78	0,37
11	23,23	22,81	7,88	0,98	0,35	11	10,91	9,55	8,05	0,88	0,84
12	23,83	13,00	6,06	0,55	0,47	12	13,71	7,37	5,13	0,54	0,70
13	21,66	12,14	10,48	0,56	0,86	13	12,3	10,37	3,68	0,84	0,35
14	21,65	15,35	12,37	0,71	0,81	14	18,43	10,19	4,99	0,55	0,49
15	17,63	11,22	9,93	0,64	0,89	15	9,83	8,50	8,34	0,86	0,98
16	17,67	17,58	14,85	0,99	0,84	16	14,25	11,23	5,90	0,79	0,53
17	16,69	16,10	7,76	0,96	0,48	17	12,05	8,37	8,16	0,69	0,97
18	16,91	14,14	12,85	0,84	0,91	18	12,9	9,47	4,96	0,73	0,52
19	20,01	14,77	8,30	0,74	0,56	19	13,58	12,75	4,83	0,94	0,38
20	20,93	15,28	7,24	0,73	0,47	20	17,49	10,35	6,77	0,59	0,65
21	18,44	16,86	9,68	0,91	0,57	21	14,94	10,86	7,10	0,73	0,65
22	17,5	17,17	8,92	0,98	0,52	22	13,76	9,64	8,81	0,70	0,91
23	19,04	14,75	9,47	0,77	0,64	23	11,71	6,09	4,32	0,52	0,71
24	16,98	12,22	10,23	0,72	0,84	24	11,03	9,05	5,48	0,82	0,61
25	23,7	11,98	8,88	0,51	0,74	25	11,99	9,08	6,07	0,76	0,67
Média				0,74	0,67	Média				0,71	0,70

De acordo com a norma ES 386/99 do DNER, o valor de índice de forma estabelecido deve ser maior que 0,5, valores encontrados para os dois agregados brita 0 e brita 1. A classificação da forma do corpo-de-prova é definida cúbica conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação da forma do corpo-de-prova

Média das relações b/a e c/b	Classificação da forma
b/a maior que 0,5 e c/b maior que 0,5	cúbica
b/a menor que 0,5 e c/b maior que 0,5	alongada
b/a maior que 0,5 e c/b menor que 0,5	lamelar
b/a menor que 0,5 e c/b menor que 0,5	Alongada-lamelar

Fonte: ABNT NBR 6954:1989

3.2.3.3 Abrasão Los Angeles

Para o ensaio de abrasão “Los Angeles” foi utilizada a norma da ABNT NBR NM 51:2001 e os agregados brita 1 e brita 0. A granulometria escolhida, de acordo com a Tabela 8 da norma, está ligada à sua representatividade, portanto, para a brita 1, foram pesados 2,5 kg do material retido na peneira 9,5 mm e 2,5 kg retido na peneira 12,5 mm. Para a brita 0 também se utilizou 2,5 kg de material retido na peneira 6,3 mm e 2,5 kg na peneira 4,8 mm. O material foi lavado e levado à estufa.

Tabela 8 - Graduação para ensaio

Peneiras (Abertura) mm		Amostra - massa parcial						
Material		Graduação						
Passa	Retido	A	B	C	D	E	F	G
75	63					2500±50		
63	50					2500±50		
50	37,5					5000±50	5000±50	
37,5	25	1250±25					5000±25	5000±25
25	19	1250±25						5000±25
19	12,5	1250±10	2500±10					
12,5	9,5	1250±10	2500±10					
9,5	6,3			2500±10				
6,3	4,75			2500±10				
4,75	2,36				5000±10			
Massas totais (g)		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000±50
Nº Rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: ABNT NBR NM 51:2001

Tabela 9 – Carga Abrasiva

Graduação	Número de esferas	Massa da carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

NOTA - Verificar periodicamente se as esferas satisfazem às condições físicas quanto a massa, dimensões e uniformidade da superfície.

Fonte: ABNT NBR NM 51

A brita 1 se encaixa na graduação B como mostrada na Tabela 8, e a Brita 0 na graduação C. Com essa graduação e a Tabela 9 de carga abrasiva, foi definida a quantidade de 11 esferas para brita 1 e 8 esferas para brita 0.

O material da brita 1 já seco em estufa foi colocado no cilindro com as esferas correspondentes e foi dado o prosseguimento do ensaio. O mesmo foi feito para brita 0. Após o procedimento, o material foi retirado do cilindro, lavado na peneira com abertura de malha de 1,7 mm, levado à estufa a $(107,5 \pm 2,5) ^\circ\text{C}$ e pesado com precisão de 1 g. A Figura 14 ilustra o procedimento. O resultado é obtido em porcentagem de perda da abrasão dada pela equação (3) e apresentado na Tabela 10.

$$P = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que,

P: é a perda por abrasão, expressa em porcentagem;

m: é a massa da amostra seca, expressa em gramas;

m_1 : é a massa do material retido na peneira com abertura de malha de 1,7 mm, expresso em gramas.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles

Ensaio abrasão "Los Angeles"			
Agregado	peso antes (g)	peso depois (g)	Abrasão (%)
Brita 1	5001,6	4478,2	10,46
Brita 0	5000,0	4377,4	12,45

Os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles, tanto para a brita 1 quanto para brita 0 apresentou abrasão baixa. A norma define que o valor aceitável é de menor ou igual a 30%, sendo portando, para esses agregados em estudo, aceitável por estar dentro dos padrões.

Figura 14 - Algumas das etapas do ensaio de abrasão

a) Preparação da amostra / peso



b) Esferas para o ensaio



c) Cilindro para realização do experimento



d) Material sendo lavado na peneira com abertura de malha 1,7mm.



Fonte: Autor, 2017

3.2.3.4 Equivalente de Areia

Para o ensaio de equivalente de areia, foi utilizada a norma da ABNT NBR 12052:1992 e os agregados pedrisco e pó de pedra. Foi preparada a solução para o experimento com cloreto de cálcio anidro, glicerina, formaldeído a 40% e água destilada conforme norma.

Foram utilizadas duas provetas para realizar o experimento. Foi sifonada a solução de trabalho nas duas provetas a fim de se atingir o traço de referência a 10 cm da base. Transferiu-se para a proveta a amostra de material previamente preparada e rasada na superfície. Após 10 minutos, tapou-se a proveta com a rolha de borracha e agitou-se vigorosamente em 90 ciclos em aproximadamente 30 s. Após agitar, retirou-se a rolha e introduziu o tubo lavador lavando as paredes da proveta e agitando a fim de levantar o material argiloso e preencher com a solução até a marcação desejada deixando repousar por 20 minutos (Figura 15).

Após o repouso, foi realizada a leitura do nível superior da suspensão argilosa nas duas provetas e após, inserido o pistão cuidadosamente até assentar completamente na areia girando para que os parafusos ficassem visíveis a fim de se determinar o nível e realizar a medição. O resultado do ensaio foi obtido de uma média aritmética das duas determinações, expresso em porcentagem conforme equação (4) e apresentado na Tabela 11.

$$EA = \frac{\text{Leitura topo da areia}}{\text{Leitura topo de argila}} \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo,

EA o equivalente de areia, expresso em porcentagem;

Tabela 11 - Resultado do ensaio de equivalente de areia

Pedrisco e Pó de pedra - Equivalente de areia			
	Leitura topo da areia (cm)	Leitura topo da argila (cm)	Equivalente de areia (%)
Proveta 1	10,8	13,30	81,20
Proveta 2	9,50	11,15	85,20
Média			83,20

Os resultados de equivalente de areia obtidos com agregado miúdo apresentaram valores maiores que o mínimo estabelecido em norma que define igual ou superior a 55%, estando, portanto, dentro dos padrões.

Figura 15 - Algumas das etapas do ensaio de equivalente de areia

a) Preparação da amostra



b) Rasamento da amostra no recipiente



c) Transferência do material para a proveta



d) Agitação da proveta



e) Repouso de 20 minutos



f) Medição



Fonte: Autor, 2017

3.2.4 Análise Granulométrica

Para a determinação da composição granulométrica foi realizada a redução da amostra com utilização do separador mecânico de acordo com a norma da ABNT NBR NM 27 e ME 083/98 do DNER. A quantidade de material utilizada para a granulometria foi de 7 kg para brita 1,5 kg para brita 0 e 1 kg para pedrisco e pó de pedra como mostra Tabela 12 de acordo com a dimensão máxima característica do agregado.

Tabela 12 - Massa mínima, por amostra de ensaio

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
Agregados miúdos:	
4,8	1
Agregados graúdos:	
9,5	5
19,0	7
25,0	10
38,00	15
50,00	20

Fonte: DNER-ME 083/98

Com o auxílio do agitador mecânico de peneira, foi realizado o peneiramento do material e as massas retidas foram pesadas e anotadas.

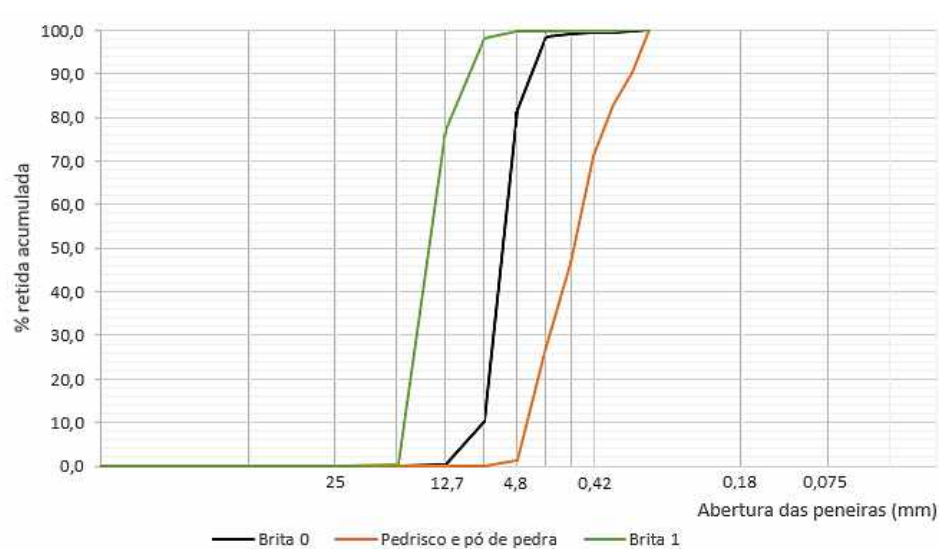
Os resultados de granulometria dos agregados gráudo e miúdo são apresentados na Tabela 13 e suas respectivas curvas na Figura 16.

Tabela 13 - Resultado da granulometria da Brita 1, Brita 0, Pedrisco com Pó-de-pedra

BRITA 1				BRITA 0			
Peneiras	Massa retida	%	% retida	Peneiras	Massa retida	%	% retida
(mm)	(g)	retida	acumulada	(mm)	(g)	retida	acumulada
38	0,0	0,0	0,0	38	0,0	0,0	0,0
32	0,0	0,0	0,0	32	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	25	0,0	0,0	0,0
19,5	29,5	0,4	0,4	19,5	0,0	0,0	0,0
12,7	5357,0	76,5	77,0	12,7	20,1	0,4	0,4
9,5	1494,4	21,3	98,3	9,5	496,4	9,9	10,3
4,8	115,8	1,7	100,0	4,8	3562,7	71,3	81,6
2	0,1	0,0	100,0	2	847,8	17,0	98,5
1,18	0,1	0,0	100,0	1,18	27,1	0,5	99,1
0,42	0,2	0,0	100,0	0,42	12,3	0,2	99,3
0,18	0,5	0,0	100,0	0,18	4,8	0,1	99,4
0,075	0,9	0,0	100,0	0,075	12,7	0,3	99,7
fundo	1,1	0,0	100,0	fundo	15,8	0,3	100,0
total	6999,6	100,0		total	4999,7	100,0	
Dimensão Máxima (mm)			19,5	Dimensão Máxima (mm)			12,7
Mód. De finura			6,0	Mód. de finura			5,1

PEDRISCO + PÓ DE PEDRA			
Peneiras	Massa retida	%	% retida
(mm)	(g)	retida	acumulada
38	0,0	0,0	0,0
32	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0
19,5	0,0	0,0	0,0
12,7	0,0	0,0	0,0
9,5	0,0	0,0	0,0
4,8	11,9	1,2	1,2
2	262,3	26,3	27,5
1,18	190,8	19,1	46,6
0,42	243,8	24,4	71,0
0,18	118,8	11,9	82,9
0,075	72,4	7,3	90,2
fundo	98,2	9,8	100,0
total	998,2	100,0	
Dimensão Máxima (mm)			4,8
Mód. de finura			3,2

Figura 16 - Curvas granulométrica dos agregados



Fonte: Autor, 2017

Em um primeiro momento, seriam usadas apenas a brita 1 e pó de pedra com pedrisco, porém, com os resultados obtidos na granulometria, notou-se a pequena porcentagem de material retido na peneira 4,8 mm, optando-se então por usar também a brita 0.

3.2.5 Definição da Faixa Granulométrica

A faixa granulométrica V foi utilizada nessa pesquisa, conforme norma ES 386/99 do DNER apresentada na Tabela 14.

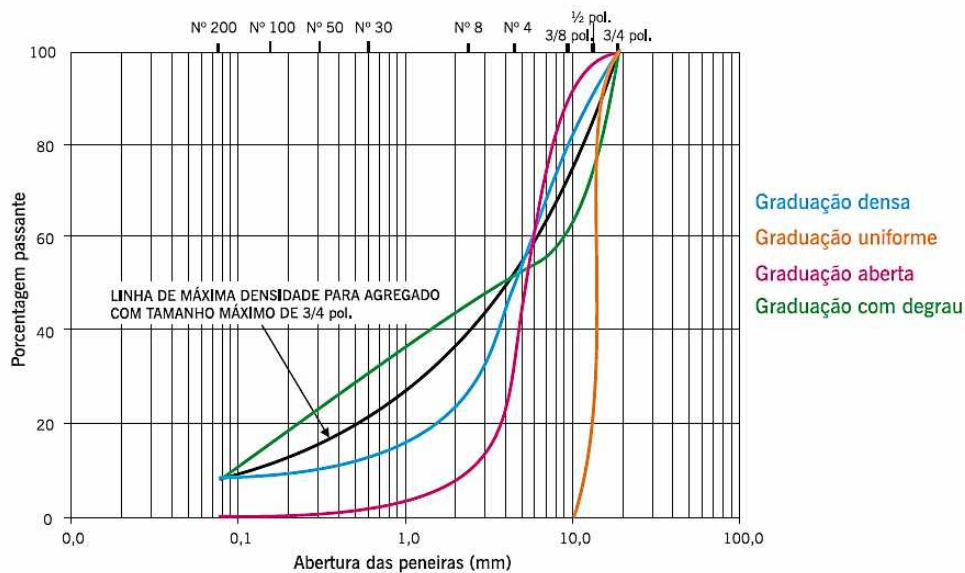
Tabela 14 - Faixas granulométricas da Camada Porosa de Atrito (CPA)

ABNT	Abertura mm	Porcentagem passante, em peso (faixas)				
		I	II	III	IV	V
¾ "	19,0	-	-	-	-	100
½ "	12,5	100	100	100	100	70 – 100
3/8 "	9,5	80 – 100	70 – 100	80 – 90	70 – 90	50 – 80
Nº 4	4,8	20 – 40	20 – 40	40 – 50	15 – 30	18 – 30
Nº 10	2,0	12 – 20	5 – 20	10 – 18	10 – 22	10 – 22
Nº 40	0,42	8 – 14	-	6 – 12	6 – 13	6 – 13
Nº 80	0,18	-	2 – 8	-	-	-
Nº 200	0,075	3 - 5	0 - 4	3 - 6	3 - 6	3 - 6

Fonte: DNER – ES 386/99

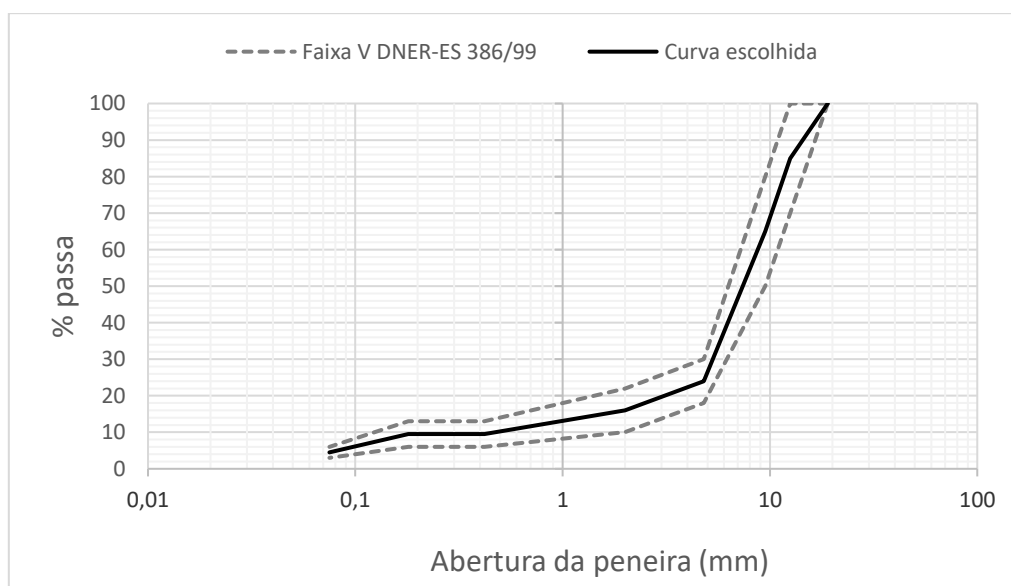
A granulometria para essa mistura asfáltica porosa apresenta pouca percentagem de finos. A Figura 17 apresenta exemplos de distribuição granulométrica para diferentes tipos de misturas asfálticas.

Figura 17 - Exemplos das curvas granulométricas de diferentes tipos de misturas asfálticas.



Fonte: Bernucci *et al.*, (2008)

Figura 18- Curva granulométrica da Camada Porosa de Atrito (CPA) de acordo com a faixa do DNER-ES 396/99



Fonte: Autor, 2017

A Figura 18 apresenta a curva granulométrica desse trabalho em relação à faixa escolhida e especificada pelo DNER, define-se mau graduada (de graduação aberta) com insuficiência de finos, propício para a execução desse tipo de mistura favorecendo um maior volume de vazios.

3.2.6 Dosagem da Mistura Asfáltica Porosa

Após proceder os ensaios dos agregados com a necessidade de conhecer as especificidades desses materiais e garantir, na dosagem, um padrão técnico qualitativo, foram realizados ensaios para se verificar os parâmetros volumétricos da mistura asfáltica compactada pelo método Marshall: densidade máxima teórica da mistura solta, densidade aparente do corpo-de-prova compactado, resistência à tração por compressão diametral, perda de massa por abrasão cântabro e permeabilidade.

3.2.6.1 Ensaio de Compactação Marshall

Com a curva granulométrica escolhida para trabalho, realizou-se o ensaio Marshall conforme norma ME 043/95 do DNER. Os agregados foram pesados de acordo com a faixa granulométrica e levados à estufa na temperatura de 194°C até sua estabilização. O ligante foi aquecido até a temperatura 181°C. A mistura foi realizada conforme a norma, sendo três corpos-de-prova para cada teor de ligante (5 teores de asfalto de teste). Foi utilizada fibra em uma porcentagem de 0,3% em relação a massa total da mistura. Após duas horas em estufa à temperatura de compactação de 169° C as misturas foram compactadas por impacto utilizando o compactador mecânico com 75 golpes em cada face. Depois de compactados, os corpos-de-prova foram deixados em repouso de no mínimo 12 h, à temperatura ambiente antes do desmolde. A Figura 19 ilustra algumas etapas do processo. Após o desmolde dos corpos-de-prova, obteve-se as dimensões dos mesmos e sua identificação com números de acordo com as porcentagens de CAP.

Figura 19 - Algumas etapas da preparação da mistura para ensaio Marshall



Fonte: Autor, 2017

A Tabela 15 apresenta a proporção dos materiais utilizados na elaboração da mistura asfáltica.

Tabela 15 - Resumo de projeto para dosagem da Camada Porosa de Atrito (CPA)

Resumo do projeto		
Curva granulométrica da mistura - CPA		
Peneira (mm)	Faixa V DNER-ES 386/99	Curva escolhida
19	100 - 100	100
12,5	70 - 100	85
9,5	50 - 80	65
4,8	18 - 30	24
2	10 - 22	16
0,42	6 - 13	9,5
0,18	-	-
0,075	3 - 6	4,5
Características da Mistura		
Energia de compactação	75 golpes/face	
Temperatura de compactação	169°C	
Temperatura da mistura	181°C	
Temperatura do agregado	194°C	
Porcentagem de fibra	0,3%	

Fonte: Autor (2017)

3.2.6.2 Parâmetros Volumétricos

Os parâmetros volumétricos realizados nesse experimento foram: densidade máxima teórica da mistura, densidade aparente do corpo-de-prova e volume de vazios, parâmetros necessários para dosagem da Camada Porosa de Atrito, segundo norma. Os parâmetros das misturas betuminosas densas, incluem ainda a determinação da percentagem de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e a Relação Betume-Vazios (RBV), também interessantes de serem analisados, apesar de não serem critérios para a dosagem do CPA.

3.2.6.2.1 Densidade máxima teórica da mistura – G_{mm}

O ensaio foi realizado seguindo a norma da ABNT NBR 15619:2012. A amostra para a execução do ensaio foi composta de mistura asfáltica não compactada preparada em laboratório com massa de 1500 g e mantida em estufa na temperatura de compactação até realização do procedimento.

Os grumos da mistura asfáltica foram desfeitos manualmente com a mistura ainda quente. A mistura solta esfriou à temperatura ambiente e foi colocada em um kitassato já com a tara, obtendo assim sua massa. Adicionou-se água destilada à temperatura de $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ a uma altura de 5 cm do nível do agregado no recipiente e foi colocado uma rolha. O recipiente foi levado a um agitador mecânico para remoção do ar da amostra pela aplicação de pressão de vácuo de aproximadamente 730 mm Hg durante $(15,0 \pm 2,0)$ min. Após a aplicação do vácuo, completou-se o kitassato com água destilada tomado o devido cuidado para não introduzir ar na amostra e pesou-se o conjunto. A densidade máxima teórica da mistura asfáltica foi obtida pela equação (5). A Figura 20 mostra algumas etapas do processo.

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \cdot 0,9971 \quad (5)$$

Em que,

G_{mm}: é a densidade máxima teórica da mistura, adimensional;

A: é a massa da amostra seca em ar, expresso em gramas;

B: é a massa do recipiente com volume completo com água, expresso em gramas;

C: é a massa do recipiente contendo a amostra submersa em água, expresso em gramas.

Nota: A constante 0,9971 refere-se à massa específica da água a 25°C

Figura 20 - Algumas etapas do ensaio de densidade máxima teórica da mistura

a) Mistura destorroadada



b) Peso kitassato completo com água



c) Massa da mistura sem água



d) Mistura com água destilada



e) Kitassato no agitador ligado na pressão de vácuo



f) Mistura completa com água destilada



3.2.6.2.2 Densidade aparente do corpo-de-prova – Gmb

Para calcular a densidade aparente dos corpos-de-prova compactados pelo Marshall, foi utilizada a norma ME 117/94 do DNER com procedimento de acordo com o volume de vazios superior a 10%. O procedimento foi realizado em 3 etapas. Na primeira etapa, os corpos-de-prova foram identificados e pesados (massa seca ao ar). Na segunda, cada um deles foi envolvido totalmente com fita adesiva, pesados e seus valores anotados. Na última etapa, os corpos-de-prova adesivados foram envolvidos por parafina tornando a superfície mais impermeável possível e depois pesados. Após essas etapas, cada corpo-de-prova foi pesado imerso em água à temperatura ambiente. A densidade aparente da parafina empregada e da fita adesiva foi de 0,89 e 0,97 respectivamente. A Figura 21 ilustra os corpos-de-prova com fita e parafinados. O resultado é calculado pela equação (6).

Figura 21 - Preparação dos corpos-de-prova para ensaio de densidade aparente

a) Corpos-de-prova adesivados



b) Corpos-de-prova parafinados



Fonte: Autor, 2017

$$G_{mb} = \frac{P_{ar}}{P_3 - P_4 - \frac{P_2}{d_f} - \frac{P_3 - P_1}{d_p}} \quad (6)$$

Em que,

G_{mb} : é a densidade aparente do corpo-de-prova;

P_{ar} : é o peso do corpo-de-prova ao ar, expresso em gramas;

P_1 : é o peso do corpo-de-prova com fita adesiva, expresso em gramas;

P_2 : é o peso da fita adesiva, expresso em gramas;

P_3 : é o peso do corpo-de-prova com fita adesiva recoberto com parafina ao ar, expresso em gramas;

P_4 : é o peso do corpo-de-prova com fita adesiva recoberto com parafina imerso em água, expresso em gramas;

d_f : é a densidade aparente da fita adesiva (=0,97);

d_p : é a densidade aparente da parafina empregada (=0,89).

3.2.6.2.3 Volume de vazios do corpo-de-prova – VV

Para o cálculo do volume de vazios dos corpos-de-prova foi utilizada a norma da ABNT NBR 15573:2012. O valor é calculado baseado nos dados de densidade aparente do corpo-de-prova (G_{mb}) e da densidade máxima teórica de misturas asfálticas em amostras não compactadas (G_{mm}). Assim o valor, expresso em porcentagem, é dado pela equação (7).

$$Vv = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \cdot 100 \quad (7)$$

Em que,

Vv : é o volume de vazios, expresso em porcentagem;

G_{mb} : é a densidade aparente do corpo-de-prova, adimensional;

G_{mm} : é a densidade máxima teórica da mistura asfáltica, adimensional.

3.2.6.3 Perda de massa por abrasão cântabro

A norma da ABNT NBR 15140:2014 especifica o método de ensaio para a perda de massa por abrasão cântabro. Para a realização desse ensaio, os corpos-de-prova devem ser moldados pelo processo Marshall, mantidos à temperatura de $(25 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ por pelo menos sete dias antes de dar sequência ao ensaio cântabro. Após sua identificação, foram determinadas suas massas e um por vez foram colocados no tambor de abrasão Los Angeles. Foram realizadas 300 revoluções a uma velocidade entre 30 rpm e 33 rpm. Após completada as revoluções, o corpo-de-prova foi retirado, limpo superficialmente com ar comprimido e sua massa anotada. A Figura 22 mostra o tambor para ensaio e os corpos-de-prova ensaiados. A perda de massa é calculada pela equação (7).

Figura 22 - Ensaio Cântabro, aparelho e corpos-de-prova ensaiado

a) Máquina de abrasão Los Angeles



b) Corpos-de-prova ensaiados



Fonte: Autor, 2017

$$A = \frac{m - m'}{m} \cdot 100 \quad (7)$$

Em que,

A: é a perda de massa por abrasão, expressa em porcentagem;

M: é a massa do corpo-de-prova antes do ensaio, expressa em gramas;

m': é a massa do corpo-de-prova após o ensaio, expressa em gramas.

3.2.6.4 Resistência à tração por compressão diametral

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, foi utilizada a norma da ABNT NBR 15087:2012. Os corpos-de-prova separados para ensaio tiveram suas medidas de altura e diâmetro anotadas e mantidas a uma temperatura de $(25 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$, no mínimo 4 h antes da realização do ensaio. O corpo-de-prova a ser ensaiado foi posicionado no dispositivo centralizador, levada à máquina universal de ensaio, apoiado na prensa hidráulica e aplicada a carga de compressão progressivamente, sendo com velocidade de deslocamento de $0,8 (\pm 0,1) \text{ mm/s}$ até seu rompimento. A Figura 23 ilustra o momento de realização do ensaio. A resistência à tração foi calculada pela utilização da equação (8).

$$RT = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (8)$$

Em que,

RT: é a resistência à tração por compressão diametral, expressa em (MPa);

F: é a carga de ruptura, expressa em (N);

D: é o diâmetro do corpo-de-prova, expresso em (mm);

H: é a altura do corpo-de-prova, expressa em (mm).

Figura 23 - Realização do ensaio de resistência a compressão diametral



Fonte: Autor, 2017

3.2.6.5 Ensaio de Permeabilidade

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade do corpo-de-prova, devido à ausência de norma para esse tipo de mistura asfáltica, elaborou-se um equipamento que fosse capaz de vedar as laterais da amostra a fim de que houvesse somente um sentido de percolação da água e um outro componente capaz de permitir um acúmulo de água. Assim, os materiais utilizados foram: luva dupla de esgoto de 100 mm de diâmetro; anel de vedação de 100 mm, tubo de PVC de 100 mm de diâmetro e silicone a base de borracha. A montagem sucedeu-se na inserção do anel de vedação em um lado da luva dupla de esgoto, encaixe do corpo-de-prova, e inserção de outro anel de vedação. Vedaram-se as bordas do corpo-de-prova na lateral da luva com o silicone dos dois lados e aguardou a secagem do silicone por 24 horas. O tubo de PVC de 30 cm de comprimento foi encaixado na luva com ajuda de vaselina no anel de vedação. O sistema é ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Etapas de montagem do sistema

- a) Luva dupla de esgoto com os anéis de vedação



- b) Corpo-de-prova vedado com silicone (parte externa)



- c) Corpos-de-prova antes do encaixe do tubo de PVC na parte interna da luva



- d) Equipamento montado



Fonte: Autor, 2017

Uma régua milimétrica foi anexada por dentro do tubo de PVC no intuito de medir a altura inicial e final da percolação da água no corpo-de-prova com relação ao tempo. O coeficiente de permeabilidade é calculado pela equação (9).

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log \frac{h_0}{h_1} \quad (9)$$

Em que,

K: é o coeficiente de permeabilidade, expresso em cm por segundo;

a: é a área do tubo de PVC, expressa em cm²;

A: é a área do corpo-de-prova, expressa em cm²;

L: é a altura do corpo-de-prova, expressa em cm;

t: é o tempo de ensaio, expresso em segundos;

h₀: é a altura inicial da água, expressa em cm;

h₁: é a altura final da água, expressa em cm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios são apresentados e discutidos nesse capítulo. As avaliações concentraram-se no projeto da mistura asfáltica (dosagem Marshall), nos resultados dos ensaios Cântabro e de permeabilidade. Além disso, foi realizada uma proposta de projeto de estrutura de pavimento permeável para a área de estacionamento do Campus Santa Mônica.

4.1 Propriedades volumétricas

A Tabela 16 apresenta os resultados do cálculo da densidade máxima teórica da mistura solta para cada teor de ligante de teste.

Tabela 16 - Resultado da densidade máxima teórica da mistura para cada teor de ligante

Teor de Ligante (%)	Ligante (g)	Agregado (g)	Massa da amostra seca em ar (g)	Massa do kitassato com água - completo (g)	Massa do kitassato contendo amostra submersa em água (g)	Densidade máxima teórica da mistura (Gmm)
4	60	1500	1517,2	3331,1	4286,5	2,693
4,5	67,5	1500	1516,4	3331,1	4283,1	2,679
5	75	1500	1505,1	3331,1	4273,7	2,668
5,5	82,5	1500	1491,2	3331,1	4262,2	2,655
6	90	1500	1482,6	3331,1	4254,9	2,645

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos para a densidade aparente dos corpos-de-prova compactados. Foi adotado o ensaio Marshall (DNER-ME 043/95) na obtenção dos corpos-de-prova.

Tabela 17 - Resultados obtidos para densidade aparente do corpo-de-prova

CP	Peso Seco (g)	Peso cp + fita (g)	Peso cp+Parafina + fita(g)	Peso lmerso (g)	Gmb
1.1	1126,08	1129,37	1172,15	597,87	2,019
1.2	1126,45	1129,63	1170,91	595,84	2,010
1.3	1119,13	1122,2	1153,37	590,28	2,000
2.1	1126,11	1128,86	1156,72	595,46	2,004
2.2	1123,37	1126,55	1152,39	605,32	2,044
2.3	1105,59	1108,73	1135,92	582,73	1,997
3.1	1127,64	1130,76	1158,32	598,58	2,012
3.2	1138,04	1141,19	1167,41	617,02	2,058
3.3	1117,01	1120,26	1147,67	603,58	2,051
4.1	1126,83	1129,71	1153,96	604,78	2,034
4.2	1129,71	1132,86	1154,08	612,06	2,054
4.2	1118,27	1121,26	1141,62	604,23	2,048
5.1	1123,74	1126,75	1148,89	608,21	2,052
5.2	1131,71	1134,51	1153,78	609,82	2,041
5.3	1119,79	1122,9	1140,96	599,26	2,025

O volume de vazios foi calculado relacionando os valores de Gmm e Gmb conforme Tabela 18. Os valores de volume de vazios estabelecidos pela norma ES 386/99 do DNER são de 18% a 25%, sendo os resultados encontrados no experimento satisfatórios.

Tabela 18 - Resultado obtidos para volume de vazios

Teor de ligante (%)	Gmb	Gmm	VV (%)	Média VV (%)
4,0	2,019	2,693	25,02	25,37
	2,010		25,35	
	2,000		25,73	
4,5	2,004	2,679	25,21	24,39
	2,040		23,85	
	2,033		24,10	
5,0	2,012	2,668	24,60	23,53
	2,058		22,86	
	2,051		23,12	
5,5	2,034	2,655	23,37	22,95
	2,054		22,62	
	2,048		22,86	
6,0	2,052	2,645	22,42	22,91
	2,041		22,85	
	2,025		23,45	

4.2 Comportamento mecânico

Foi adotado o ensaio Marshall (DNER-ME 043/95) na obtenção dos corpos-de-prova para os ensaios de comportamento mecânico. Os resultados de perda de massa por abrasão cântabro para cada teor de ligante são mostrados na Tabela 19. O limite estabelecido por norma do ES 386/99 do DNER é de no máximo 25%, sendo os valores encontrados no experimento satisfatórios.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de perda de massa por abrasão cântabro

Ensaio Cântabro					
CP	Teor Ligante	Peso Seco (g)	Peso após ensaio (g)	% Desgaste	Média
1.2	4,0%	1124,1	912,2	18,85%	18,64%
1.4	4,0%	1125,9	918,3	18,44%	
2.2	4,5%	1120,5	997,2	11,00%	10,31%
2.4	4,5%	1124,2	1016,2	9,61%	
3.2	5,0%	1135,2	1068	5,92%	7,22%
3.4	5,0%	1128,5	1032,4	8,52%	
4.2	5,5%	1126,5	1080	4,13%	4,25%
4.4	5,5%	1121	1071,9	4,38%	
5.2	6,0%	1128,9	1079,6	4,37%	4,06%
5.4	6,0%	1112,2	1070,5	3,75%	

Já os resultados de resistência à tração por compressão diametral são apresentados na Tabela 20 e seu valor limite estabelecido pela ES 386/99 do DNER é de no mínimo 0,55 MPa, valores estes superados no experimento.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

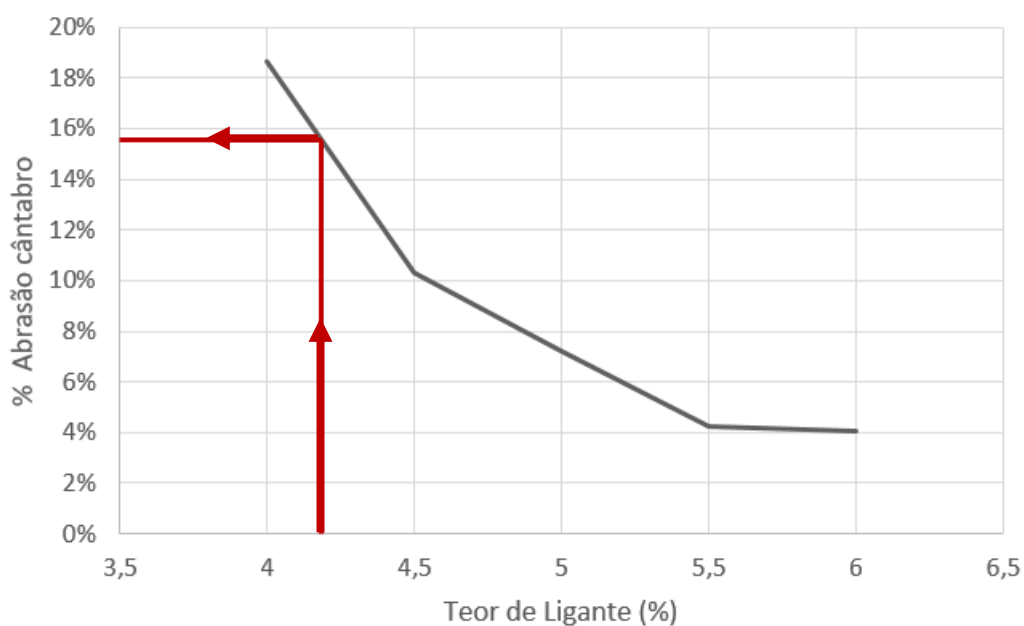
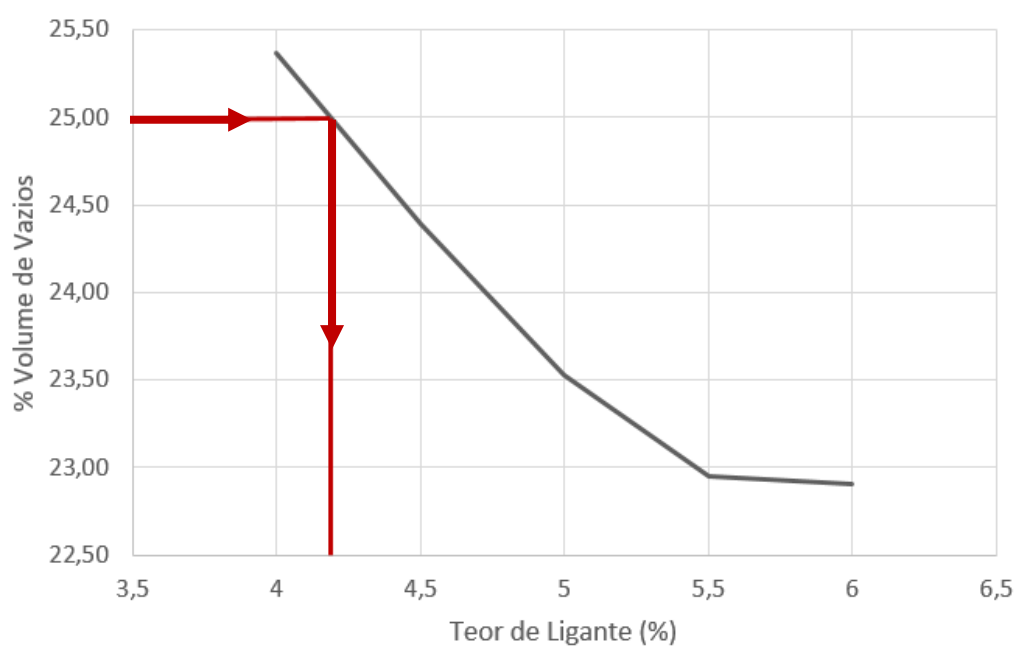
CP	Teor de Ligante	Diam. Médio (mm)	Altura média (mm)	Carga rup. (N)	RT (MPa)	Média RT (MPa)
1.1	4,00	101,80	63,83	9921,3	0,972	0,92
1.3	4,00	101,79	64,32	8862,7	0,862	
2.1	4,50	101,73	64,92	8533,1	0,823	0,91
2.3	4,50	101,85	63,49	10161,8	1,001	
3.1	5,00	101,64	64,30	8899,2	0,867	0,92
3.3	5,00	101,56	62,60	9672,8	0,969	
4.1	5,50	101,60	63,57	9645,7	0,951	0,94
4.3	5,50	101,61	62,99	9387,2	0,934	
5.1	6,00	101,72	62,35	8249,6	0,828	0,79
5.3	6,00	101,56	63,70	7710,4	0,759	

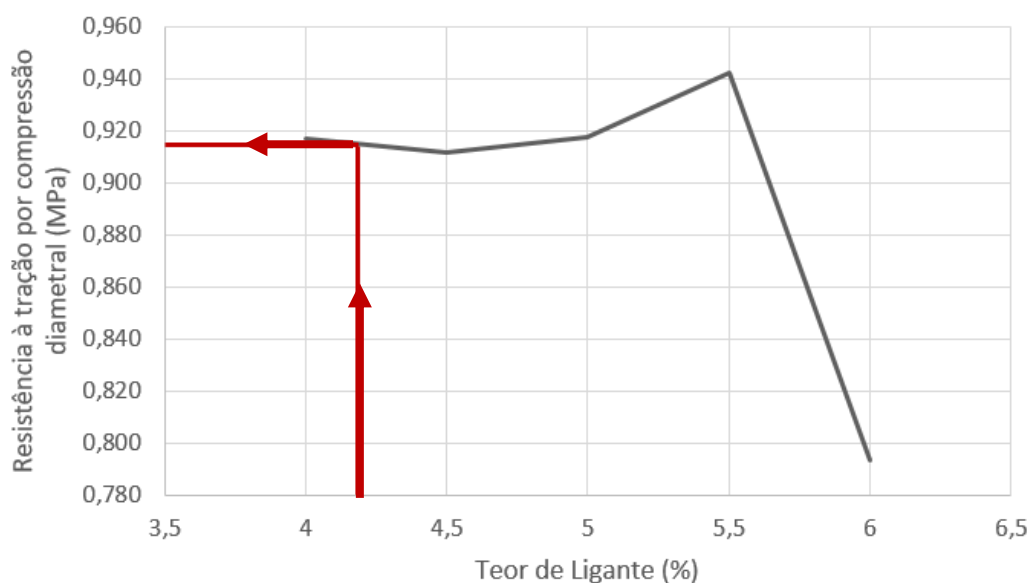
4.3 Teor de asfalto de projeto

Na recomendação da especificação ES 386/99 do DNER para CPA, o teor de ligante asfáltico sugerido é de 4,0 a 6,0%. A definição do teor de projeto baseou-se na adoção do Ensaio Marshall para a verificação de três especificações de

ensaios que são: volume de vazios, Cântabro e resistência à tração por compressão diametral. Assim, como a principal característica da camada porosa de atrito é sua permeabilidade, deve-se prevalecer o volume de vazios requeridos por norma, sendo este valor limite 25%. Foram traçadas as curvas dos parâmetros citados conforme Figura 25, para se determinar o teor de ligante de projeto.

Figura 25 - Curvas dos parâmetros determinados pela dosagem Marshall





Fonte: Autor, 2017

Estabelecendo o valor limite de volume de vazios de 25%, obteve-se um teor de ligante de 4,2%, representando para abrasão Cântabro um valor de 15,31% e para resistência à tração por compressão diametral o valor de 0,915 MPa. Valores estes, todos dentro dos limites estabelecidos em norma. Portanto o teor de projeto de ligante asfáltico foi de 4,2%.

4.4 Propriedades hidráulicas

Com teor de projeto estabelecido de 4,2%, moldaram-se 3 corpos-de-prova a fim de se verificar propriedades hidráulicas para esse teor. O procedimento foi realizado 4 vezes para cada corpo-de-prova, sendo o tempo médio usado como valor de tempo “t” para o cálculo do coeficiente de permeabilidade conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados obtidos no teste de permeabilidade

CP	a (cm ²)	L (cm)	A (cm ²)	t (s)	h ₀ /h ₁	k (cm/s)	K médio (10 ⁻² cm/s)
1	72,38229	6,29625	81,18	13,945	2	0,2787	26,73
2	72,38229	6,27975	81,17	14,505	2	0,2673	
3	72,38229	6,34725	81,01	18,065	2	0,2174	

O valor de coeficiente encontrado de $26,73 \cdot 10^{-2}$ cm/s se comparado com os valores da Tabela 22 de Zoorob (2002, apud Silva e Paiva, 2012), apresenta permeabilidade alta, sendo portanto um valor experimental válido para esse estudo.

Tabela 22 - Classe de permeabilidade de misturas betuminosas

K (cm/s)	Permeabilidade
10^{-8}	Impermeável
10^{-6}	Praticamente impermeável
10^{-4}	Drenagem baixa
10^{-2}	Drenagem razoável
10^{-1}	Drenagem alta

Fonte: Zoorob (2002, apud Silva e Paiva, 2012)

Ainda em comparação a outras misturas asfálticas a respeito da sua drenabilidade, Ferreira, Branco e Filho (2014) em seu trabalho sobre simulação numérica do fluxo d'água em pavimentos flexíveis, apresentou resultados de permeabilidade para as misturas asfálticas de CPA, areia asfáltica e concreto asfáltico, reproduzidos na Tabela 23. Os valores representados são para fins comparativos a esse trabalho, além de uma observação sobre a grande variação de permeabilidade que diferentes misturas de CPA podem apresentar.

Tabela 23 - Parâmetros volumétricos de três diferentes misturas asfálticas

Mistura Asfáltica	CAP (%)	Gmm	Gmb	Vv (%)	K (cm/s)
CA	5,0	2,447	2,349	4	$8,82 \times 10^{-5}$
			2,284	7	$3,86 \times 10^{-3}$
AA	6,5	2,383	2,203	7	$1,99 \times 10^{-5}$
			2,160	9	$2,64 \times 10^{-5}$
CPA	4,0 (modificado com 4% de SBS em massa)	2,463	1,976	20	$1,07 \times 10^{-2}$
			1,922	23	$1,24 \times 10^{-2}$

Fonte: Ferreira, Branco e Filho, 2014

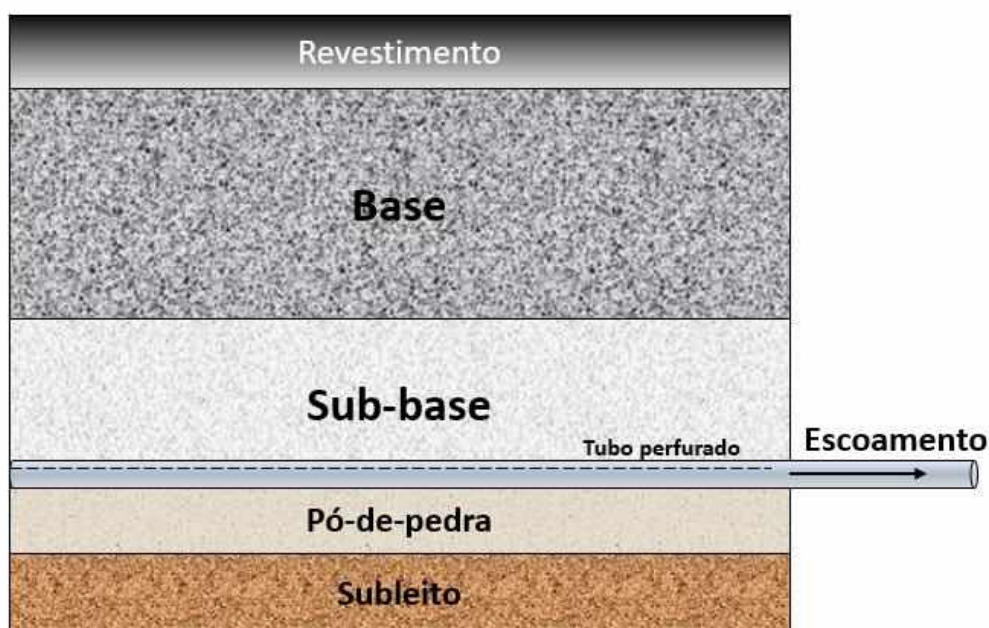
5 DIMENSIONAMENTO E PROJETO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

Para o dimensionamento, é necessário a definição preliminar do tipo de pavimento a ser implantado, o tipo de solo e tráfego, a chuva de projeto e a área de contribuição do local onde será implantado o projeto.

5.1 Tipo de Pavimento

O pavimento foi projetado para ser permeável com função de armazenamento e constituído de um revestimento de concreto asfáltico permeável e camadas de base e sub-base de brita graduada simples (BGS) e macadame hidráulico (brita 3) a fim de garantir o armazenamento de água. Acima do subleito foi projetado como revestimento uma manta impermeável a fim de não permitir a infiltração da água no solo pois toda essa água será captada. O estudo de permeabilidade do solo de subleito para esse trabalho não foi considerado. Previu-se também, dispositivos para direcionamento e posterior captação e armazenamento da água pluvial. A Figura 26 apresenta um modelo de pavimento a ser implantado nesse trabalho.

Figura 26 - Perfil genérico de pavimento com revestimento, base de reservatório e captação de água por tubo perfurado



Fonte: Autor, 2017

5.2 Dimensionamento hidráulico do reservatório

As camadas subjacentes ao revestimento poroso devem possuir altura suficiente de armazenamento do volume de água drenado da superfície, assim deve ser dimensionado baseado na chuva de projeto. Como não haverá infiltração de água no solo, o volume total escoado deverá ser armazenado na camada do reservatório.

5.2.1 Determinação da chuva de projeto

Para o dimensionamento hidráulico, faz-se necessária a determinação da chuva de projeto e da área de contribuição. No presente caso, a chuva de projeto foi obtida a partir da equação (10) genérica de intensidade-duração-frequência (IDF) para a cidade de Uberlândia-MG.

$$i = \frac{1738,2 \cdot T_r^{0,159}}{(t+14)^{0,825}} \quad (10)$$

Em que,

i: é a intensidade da chuva, expressa em mm/h;

T_r : é o tempo de retorno, expresso em anos;

t: é o tempo de duração da chuva, expressa em minutos.

A escolha do período de retorno está relacionada à análise de risco de danos e para dimensionamento de obras de engenharia minimizando os efeitos prejudiciais e estes eventos possam causar. O período de retorno adotado foi de dez anos, baseada na Tabela 24 por se tratar de um projeto de estacionamento (pavimentação de vias) e considerada de médio impacto e tempo de duração da chuva adotado igual a 15 minutos, tempo de entrada sugerido por Tucci (1995). Portanto, aplicando-se a equação 10, o valor de intensidade de chuva encontrado foi de 155,82 mm/h.

Tabela 24 - Matriz de aplicabilidade de projetos

TIPO DE OBRAS E INTERVENÇÕES			
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	PERÍODO DE RETORNO
PTV	Pontes, viadutos e passagens subterrâneas	Alto impacto	T_r
		Médio impacto	T_{25}
		Baixo impacto	T_{10}
PPE	Passarela de pedestres	Alto impacto	T_{10}
		Médio impacto	T_{10}
CAN	Canalizações e obras de drenagem	Alto impacto	T_r
		Médio impacto	T_r
		Baixo impacto	T_{25}
PAV	Pavimentação de vias	Alto impacto	T_{25}
		Médio impacto	T_{10}
		Baixo impacto	T_{10}

Fonte: Adaptado PMSP (*apud* Pinto, 2011)

5.2.2 Determinação da porosidade n

Para dimensionamento das camadas de base e sub-base do pavimento, a determinação da sua porosidade é imprescindível, sendo necessário para cada agregado utilizado, os valores de densidade seca do material, densidade real dos grãos e densidade da água. A porosidade do material é calculada pela equação (11).

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s \cdot \gamma_w} \quad (11)$$

Em que,

γ_d : é a densidade seca do material, expressa em g/cm³;

G_s : é a densidade real dos grãos, expressa em g/cm³;

γ_w : é a densidade da água, expressa em g/cm³.

Virgillis (2009) realizou o ensaio para determinação desses dados para BGS e brita 3, na qual será adotada nesse trabalho. Os valores são obtidos nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 - Parâmetros dos grãos ensaiados

PARÂMETROS DO ENSAIO	AMOSTRA	
	Brita Graduada Simples	Brita 3
Peso seco da amostra (g)	2428,3	3585,0
Peso úmido (g)	2578,3	3606,51
Peso imerso (g)	1525,0	2280,71
Temperatura (°C)	25,0	25
Densidade real dos grãos (g/cm³)	2,643	2,704

Fonte: Virgiliis, (2009)

Tabela 26 - Parâmetros estabelecidos para cálculo da porosidade das camadas

PARÂMETROS DO ENSAIO	CAMADA	
	Brita Graduada Simples	Brita 3
Massa específica aparente (g/cm³)	2,169	1,491
Densidade real dos grãos (g/cm³)	2,643	2,704
Densidade da água a 25 °C (g/cm³)	1,000	1,000

Fonte: Virgiliis, (2009)

Com os dados estabelecidos nas tabelas e o uso da eq. 11, o valor de porosidade encontrado para BGS é de 0,179 g/cm³ e da Brita 3 de 0,449 g/cm³.

5.2.3 Determinação da profundidade do reservatório

Para o cálculo da profundidade do reservatório, é utilizada a equação (12).

$$H = \frac{V_r}{n} \quad (12)$$

Em que,

H: é a profundidade do reservatório, expressa em cm;

V_r: é a altura total precipitada, correspondente à duração de t e período de retorno T, em mm

N: é a porosidade do material.

O valor de intensidade de chuva encontrado de 0,26 cm/s se comparado ao coeficiente de permeabilidade do CPA que foi de 0,27 cm/s torna capaz do revestimento absorver em totalidade, a chuva de projeto, podendo assumir (V_r) sendo 0,26 cm/s. A absorção da brita 3, camada na qual servirá de reservatório para a água, possui porosidade de 45% (0,45) conforme já citado, substituindo os valores em questão pela eq. 12 temos que a profundidade da altura do reservatório é de 34,63 cm/h, como a duração máxima de chuva adotada foi de 15 min, temos $H = 8,65$ cm no mínimo de profundidade de reservatório e será adotada 15 cm para facilidade de execução.

Vale ressaltar que para o dimensionamento hidráulico, deve-se levar em consideração ainda outros cálculos mais aprofundados a respeito do tempo de duração de chuva na região de implantação do pavimento, assim com dados mais precisos, pode-se realizar um dimensionamento mais exato.

5.3 Dimensionamento mecânico

5.3.1 Estudo de Tráfego e Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O dimensionamento do pavimento é realizado em função do número equivalente de operação de um eixo tomado como padrão, número N, durante o período de projeto escolhido. Como será dimensionado para uso em estacionamento, o tráfego previsto para esse estudo é considerado como leve. Assim, utilizou-se para a classificação e parâmetros, a Tabela 27 de instrução de projeto IP – 4 Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio, (2004).

Tabela 27 - Classificação das vias - Tráfego leve e médio

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto (anos)	Volume inicial da faixa mais carregada		N	N característico
			Veículo leve	Caminhões e ônibus		
Via local	Leve	10	100 a 400	4 a 20	$2,7 \times 10^4$ a $1,4 \times 10^5$	10^5
Via local e Coletora	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	$1,4 \times 10^5$ a $6,8 \times 10^5$	5×10^5

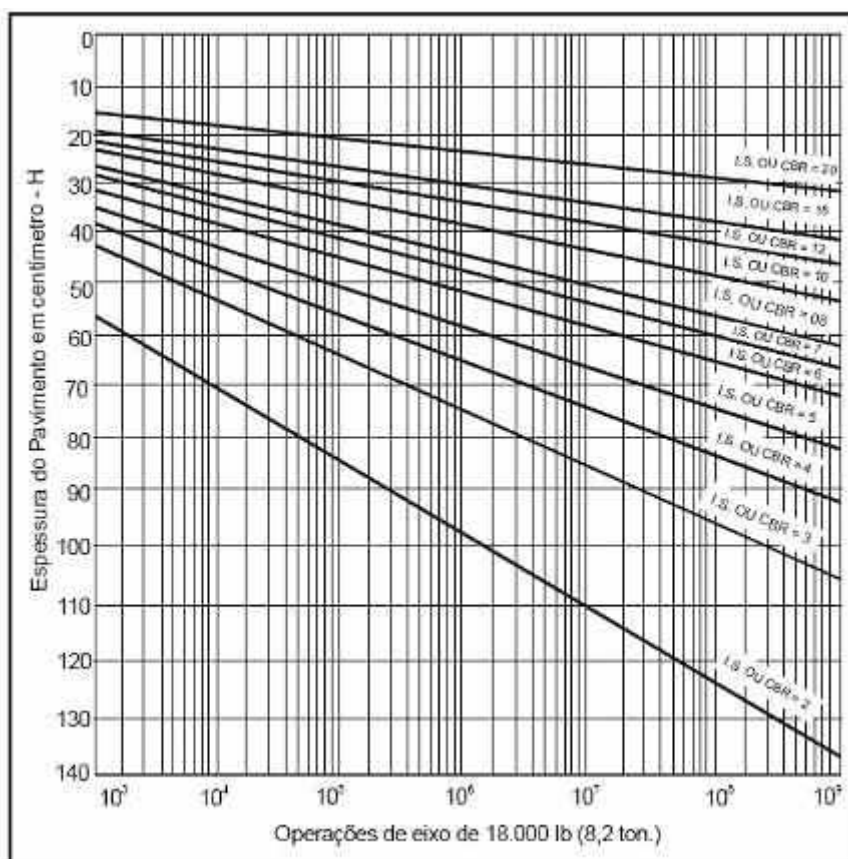
Fonte: Instrução de Projeto IP – 4 Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio (2004)

Para tráfego leve, e período de vida de projeto de 10 anos, o valor de N adotado é de 10^5 . Como o valor de Índice de Suporte Califórnia do solo de fundação desse experimento não foi estudado, foi realizado o cálculo para dois valores de CBR de 3% e 8% a fim de dimensionar com valores de baixa e média capacidade do solo.

5.3.2 Determinação da espessura total do pavimento

Com a definição do tipo de tráfego e o suporte do solo de fundação, a determinação da espessura total do pavimento é fixada de acordo com o ábaco da Figura 27. Assim o valor de espessura encontrado para CBR 3% foi de 64 cm e para o CBR de 8% de 38 cm.

Figura 27 - Ábaco de dimensionamento do pavimento



Fonte: DNER 667/22– Método de projeto de pavimentos flexíveis

5.3.3 Avaliação da espessura do revestimento

Segundo a instrução de projeto IP – 4 Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio, (2004), as espessuras mínimas de revestimento asfáltico são apresentadas na Tabela 28, porém, de acordo com Virgiliis, (2009), a fim de se evitar o processo de colmatção, adotou-se uma espessura de revestimento de 5,0 cm.

Tabela 28 - Espessuras mínimas de revestimento

TRÁFEGO	TIPO DE REVESTIMENTO	ESPESSURA (R) (cm)
Leve	Pré-Misturado a Quente (PMQ)	4,0
	Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)	3,5

Fonte: Instrução de Projeto IP – 4 Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio (2004)

5.3.4 Determinação da espessura mínima das camadas granulares

Determinada a espessura total do pavimento e do revestimento, as espessuras de base e sub-base estabelecidas nesse estudo são determinadas pelas equações (13) e (14) e os coeficientes de equivalência estrutural na Tabela 29.

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{SB} \quad (13)$$

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{SB} \cdot K_{SB} \geq H \quad (14)$$

Em que,

K_R , K_B e K_{SB} : são coeficientes estruturais do revestimento, da base e da sub-base respectivamente;

H_{SB} e H : são as espessuras em termos de material granular;

R , B e h_{SB} : são as espessuras de cada camada.

Tabela 29 - Coeficientes de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,00
Base ou revestimento de concreto magro/compactado com rolo	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,80
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,20
Base de BGS, macadame hidráulico e estabilizadas granulometricamente	1,00
Sub-bases granulares ou estabilizadas com aditivos	$\leq 1,00$
Reforço do subleito	$\leq 1,00$
Solo cimento ou BGTC, com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Base de BGTC, com resistência à compressão aos 7 dias, entre 2,8 e 4,5 MPa	1,40
Base de Solo-Cimento, com resistência à compressão aos 7 dias, menor que 2,8 e maior ou igual a 2,1 MPa	1,20
Base de Solo melhorado com Cimento, com resistência à compressão aos 7 dias, menor que 2,1 MPa	1,00

Fonte: Instrução de Projeto IP – 4 Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio (2004)

Deve-se levar em consideração que, a camada de revestimento do pavimento a ser dimensionado, não possui capacidade estrutural, portanto, não foi utilizada nos cálculos.

- Cálculo de dimensionamento para CBR do subleito = 3%

Adotando valor de CBR da sub-base de 20% (valor mínimo), foi encontrado um valor de H_{SB} de 22 cm de acordo com ábaco da Figura 26. Assim, com valores de coeficientes estruturais sendo $K_B = 1,0$ e $K_{SB} = 1,0$ as eq. 13 e 14 e valor de $H = 64$ cm temos que os valores encontrados para base e sub-base é de 22 cm e 42 cm respectivamente.

Os valores de espessura máximos e mínimos de compactação granulares são de 20 cm e 10 cm respectivamente, como a camada da sub-base encontrada foi de 42 cm, faz-se necessário realizar a compactação em duas camadas de 21 cm.

- Cálculo de dimensionamento para CBR do subleito = 8%

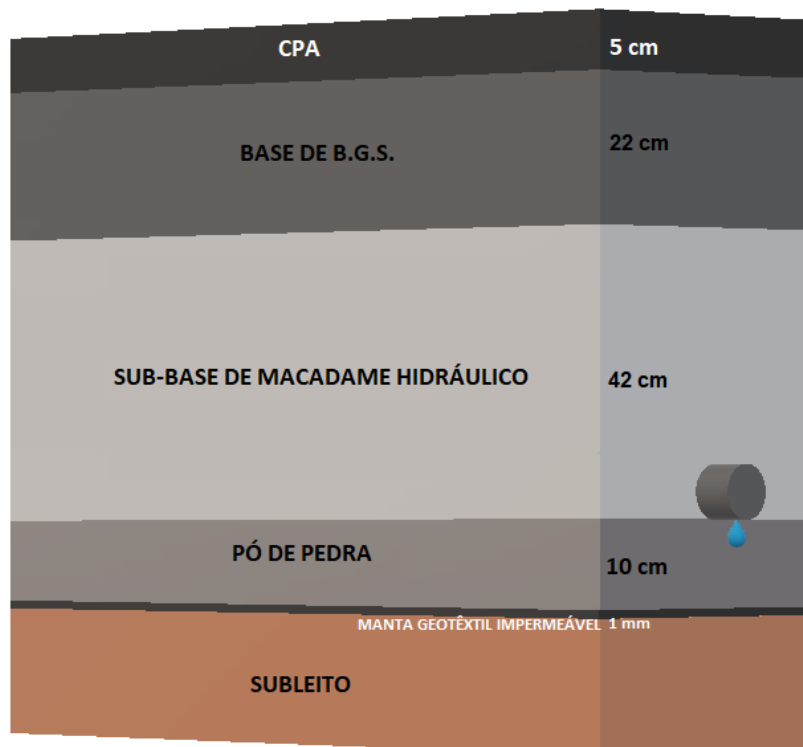
Com valor de CBR da sub-base de 20%, H_{SB} de 22 cm, coeficientes estruturais sendo $K_B = 1,0$ e $K_{SB} = 1,0$ as eq. 13 e 14 e valor de $H = 38$ cm temos que os valores encontrados para base e sub-base é de 22 cm e 16 cm respectivamente, dentro das espessuras construtivas mínimas para as camadas de 15 cm.

5.4 Configuração final do pavimento

Em comparação aos dois dimensionamentos realizados, mecânico e hidráulico, tem-se que para o pavimento hidráulico, considerado no cálculo apenas a sub-base como função de armazenamento, apresenta espessura de 10 cm. Já no dimensionamento mecânico apresentou como resultado, os valores de base e sub-base sendo 22 cm e 42 cm para CBR do subleito de 3% enquanto para CBR de 8% apresentou valores de base e sub-base de 22 cm e 16 cm respectivamente. Para configuração final, deve-se atender ambos os dimensionamentos, sendo portando os valores apresentados no cálculo de dimensionamento mecânico dentro do mínimo exigido para o hidráulico, que é 10 cm.

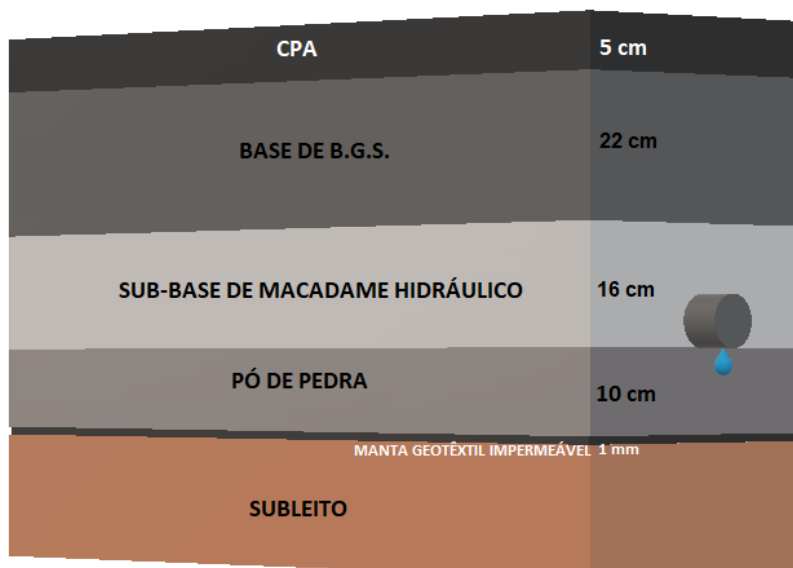
Conforme já mencionado, a água pluvial percolada pelo pavimento não infiltrará no solo, sendo, portanto, necessário o uso de manta geotêxtil. Conforme Virgiliis, (2009) a fim de se evitar que o macadame hidráulico venha a perfurar a manta, devido sua granulometria, fez-se necessário o uso de uma camada de 10 cm de pó de pedra. As Figuras 28 e 29 ilustram a configuração final do pavimento.

Figura 28 - Configuração final do pavimento com CBR do subleito de 3%



Fonte: Autor, 2017

Figura 29 - Configuração final do pavimento com CBR do subleito de 8%



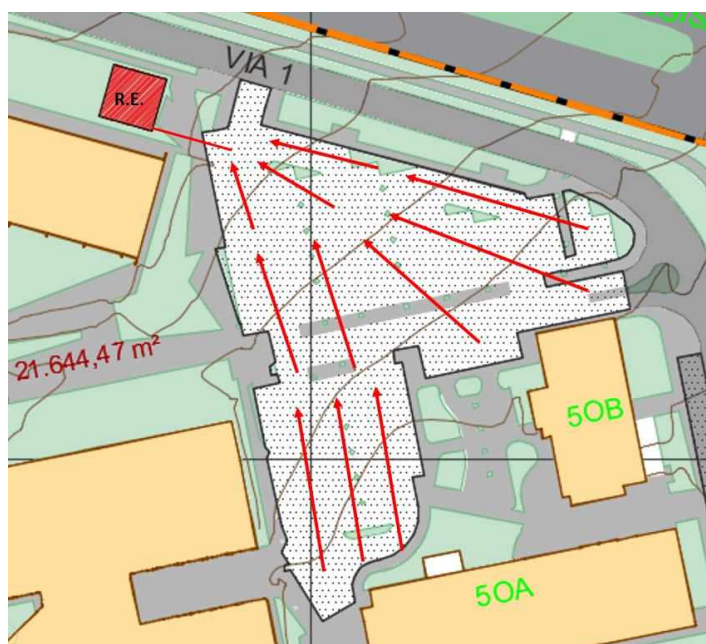
Fonte: Autor, 2017

5.5 Previsão de reserva e dimensionamento do reservatório

O local de implantação do pavimento permeável possui uma área de 3.657,43 m², pouca declividade podendo ser considerada uma área plana. Considerou-se para o cálculo de contribuição, apenas as áreas pavimentadas com pavimento permeável, portanto, regiões de microbacias e edificações não serão contabilizadas. Toda água infiltrada, será direcionada por gravidade, em consonância às curvas de nível, para um reservatório enterrado no qual será dimensionado e implantado próximo ao local. A água será drenada por tubos de PVC perfurados, permitindo a entrada de água percolada pelo pavimento, e assim conduzido ao destino final. Na Figura 30 pode-se observar o sentido de fluxo da água e o local de implantação do reservatório.

O valor de chuva de projeto encontrado de 155,82 mm/h com duração prevista para 15 minutos em uma área de 3.657,43 m² obtém-se um valor de 142,47 m³ de água. Com esse valor máximo de armazenagem de água, será construído um reservatório quadrado, moldado *in loco* e enterrado, com as dimensões de 7 m de lado com 3 m de profundidade armazenando um total de 147 m³.

Figura 30 – Sentido de escoamento da água e indicação do reservatório enterrado



Fonte: Autor, 2017

A Tabela 30 apresenta as médias mensais precipitadas na cidade de Uberlândia entre os anos de 2008 a 2012. Com uma precipitação média anual de 1450 mm dividido por 12 meses, temos uma precipitação mensal de 120,8 mm. A fim de verificar o volume máximo de reserva em 3.657,43 m² de área, temos 441,8 m³ de água por mês, o equivalente a 441.800,0 litros podendo ser usado para jardinagem no campus e caso haja tratamento posteriori dessa água, ainda poderá ser utilizada para uso interno como descarga de vasos sanitários por exemplo.

Tabela 30 - Médias mensais pluviométricas

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Méd anual
precipitação média mensal (mm)	234,3	198,9	181,2	146,8	41,6	19,1	5,0	4,1	38,8	119,5	167,2	286,8	1443,2

Esses cálculos foram realizados com o objetivo de se ter noções sobre a capacidade de volume de água que pode ser captada para a área em questão, sendo que se deve ainda levar em consideração o volume de entrada e saída de água do reservatório dentre outros fatores para só assim obter um correto dimensionamento do reservatório. O estudo para esse dimensionamento é extenso e de extrema importância, porém como o foco do trabalho foi a dosagem e dimensionamento do pavimento permeável, os valores encontrados serviram apenas como parâmetros para desenvolvimento de trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES

O trabalho baseado em um método experimental, buscou apresentar um roteiro fundamentado em normatizações para o dimensionamento de um pavimento permeável. Neste roteiro foi abrangida a caracterização dos materiais utilizados na composição da mistura, análise e definição da faixa granulométrica, ensaios de caracterização da mistura a fim de verificar a resistência quanto aos parâmetros mecânicos, ensaio de permeabilidade verificando uma das principais

características desse pavimento e por fim o dimensionamento do pavimento e seu local de implantação com a finalidade de coleta de água.

Os resultados de todos os ensaios apresentados foram satisfatórios e dentro dos padrões estabelecidos por norma, a permeabilidade da mistura foi denominada alta de acordo com o coeficiente de permeabilidade encontrado. O dimensionamento foi baseado em projetos executados por outros autores que aplicaram na pratica esse modelo de projeto, levando assim em consideração as questões dos problemas construtivos notados na sua execução como por exemplo a adição de pó de pedra para proteção da manta geotêxtil.

A escolha da implantação do local a ser aplicado o pavimento asfáltico poroso representa uma pequena parcela como exemplo de uma abrangente área que poderia ainda ser substituída por pavimento permeável, mas que devido ao curto período de estudo não pôde ser elaborada. Porém, apenas com o cálculo da previsão de reserva dessa área, pode-se ter uma ideia do potencial de captação e de sua utilidade. Apesar do custo de sua construção ser maior que o pavimento convencional, esse valor pode ter o retorno com o reaproveitamento da água coletada.

A utilização do uso para os pavimentos permeáveis é vasta. Este trabalho apresentou apenas uma fração de sua utilização. O pavimento se relaciona com a crescente preocupação com as questões ambientais para o gerenciamento das águas pluviais além de outros fatores como reduzir o efeito das ilhas de calor, redução de ruído, do efeito *spray*, da aquaplanagem, aumento do atrito pneu-pavimento e consequentemente aumento da segurança para os condutores e tudo isso em consonância ao ambiente.

Por fim espera-se que este trabalho seja base para desenvolvimento de outros futuros trabalhos e que não permaneça apenas em projeto. Seu planejamento e execução não foge dos princípios do pavimento convencional sendo necessária uma granulometria aberta e ligantes modificados com polímeros, talvez o maior desafio seja na fabricação da mistura asfáltica na qual necessita de toda uma mudança no controle tecnológico na usina. Ainda assim, esse sistema apresenta ser sustentável e ecologicamente viável.

REFERÊNCIAS

ABCP, 2010, **Melhores Práticas Pavimento Intertravado Permeável**. 1 ed. São Paulo, ABCP.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 51: Agregado Graúdo – Ensaio de abrasão “Los Ángeles”. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 53: Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 6954: Lastro-padrão – Determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.

_____. NBR 12052: Solo ou agregado miúdo – Determinação do equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 15087: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 15140: Misturas asfálticas – Determinação da perda de massa por abrasão cântabro. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 15573: Misturas asfálticas – Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos-de-prova compactados. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 15619: Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2012.

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 184p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

ASHLEY, Erin. **Using Pervious Concrete to Achieve LEED Point**. Disponível em: <http://www.perviouspavement.org/downloads/LEED_PointsAshley.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M., GOLDENFUM, J. A. – **Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial**, RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 5, n.º3 Jul/Set 2000.

Azzout Y., Barraud, S., Cres, F.N., Alfakih, E.; **Techniques Alternatives em Assainissent Pluvial**, Paris: Thechnique et Documentation 1994 – Lavoisier, 372 p.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**, Porto Alegre: ABRH, (2005), 266 p.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 504 f.

BIANCHET, D. L. **Estudo preliminar para captação de água da chuva por meio de pavimentos permeáveis na cidade de Florianópolis/SC**. Florianópolis, SC, 2015. 114p.

BRASIL. Lei Complementar 525. **Lei do uso e ocupação do solo do município de Uberlândia - MG**. Uberlândia, MG, de 14 de abril de 2011. Disponível em: <<http://www.uberlandia.mg.gov.br>>. Acesso em 07 nov. 2016.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de textos, 2005. 302p.

CASTRO, L. R., **Mezclas Drenantes**. In: 13º Congreso Ibero-Americano Del Asfalto, São José, Costa Rica 2005.

Chaignon, F. **“Porous Asphalt in France,”** The Asphalt Year Book, The Institute of Asphalt Technology, UK, 1993.

COLANDINI, VALÉRIE, **Effets des Structures Réservoirs à Revêtement Poreux Sur les Eaux Pluviales – Qualité des Eaux et Devenir des Métaux Lourds** – LCPC – Central des Ponts et Chaussées 1999.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

_____. ME 083/98: Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

_____. ME 117/94: Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994.

_____. ME 386/99: Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

DECOENE, Y. **Contribution of Cellulose Fibers to the Performance of Porous Asphalts**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1990. p. 82-86.

DINIZ, E. V. **Porous pavement – phase I – design and operational criteria**. Cincinnati, Ohio. U.S: Environmental Protection Agency, 1980. 87 p.

DUMKE, M. P. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. Florianópolis, SC, 2005, 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Evaluation of Open-Graded Friction Courses: Construction, Maintenance, and Performance. Report No. FHWA-SC-12-04. South Carolina Department of Transportation, USA, 2012.

FERGUSON, B. K., **Porous pavements**. Boca Raton: CRC Press, c2005.

FERREIRA, W. L. G., BRANCO, V. T. F. C. e FILHO, F. C. S. **Simulação Numérica Do Fluxo D'Água Em Pavimentos Flexíveis Compostos Por Diferentes Misturas Asfálticas**. XXVIII Congresso de Pesquisa e ensino em transportes. Curitiba, PR. 13p. 2014.

GONÇALVES F. J. P. **Estudo do desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros**. Exame de qualificação, PPGEC/UFRGS. (2000), 569 p.

HMA Pavement Mix Type Selection Guide, U.S Department of Transportation, FHWA, NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA). 30 p. 2000.

HOLTZ, F. C., **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: Análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011. 138 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HUBER, G., **“Performance Survey on Open-Graded Friction Course Mixes,”** NCHRP Synthesis of Highway Practice 284, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2000.

HUFFMAN, D. **Understanding Pervious Concrete**. In: The Construction Specifier. Dez./ 2005. p. 42 – 49.

IP – 04/2004: **Instrução de projeto - Dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego leve e médio**. São Paulo, SP. 23 p. 2004.

KWIATKOWSKI, M. et. al. 2007. **Evaluation of an infiltration best management practice utilizing pervious concrete**. Journal of the American Water Resources Association, Middleburg, Virgínia, v.43,n.5, p. 1208 – 1222, Out.

MARCHIONI, M., SILVA, C.O, 2010, **“Dimensionamento de Pavimentos Intertravados Permeáveis”**. 40ª RAPv - Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 26-28. Outubro 2010.

MEDINA, J., **Mecânica dos Pavimentos**. 1ª edição, 380 p. Rio de Janeiro, editora UFRJ. 1997.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010. **Pervious concrete**. Disponível em: <www.perviouspavement.org>. Acesso em: abril de 2017.

PARIAT, J. C., **Permeametre. Bulletin de Liaison de Laboratoire de Ponts et Chauseés**, n.179, (1992), p.3-9.

PEDROSA, V. A. **O controle da urbanização na macrodrenagem de Maceió: Tabuleiro do Martins**. 1996. 139 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Faculdade de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

PINTO, L.L.C.A. **O Desempenho dos Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

PRATT, C. J. 1999. **Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use**. Water Science and Technology, vol 39, nº 5. Pp 145-151.

PRUDENTE, C. Q. A.. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas utilizadas em Goiás**. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. PUTMAN, B. J.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação**. 2016. 287 f. Tese (Doutorado) - Curso de Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo., São Paulo, 2016.

SCHUELER, T. R. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs**. Washington: Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, 1987.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI. 174 p. 1997.

SILVA, C. E. D. B. D., PAIVA, C. E. L. **Estudo de permeabilidade de misturas betuminosas de graduação aberta**. Artigo técnico. Revista Pavimentação, p. 41-49, Ano VII, jul-set. 2012.

Tucci, C.E.M. **Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas**. RBRH V5 nº1 p. 61-68. 2000.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. 185p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

WANG, D., WANG, L., CHENG, K., & LIN, J. (2010). **Benefit Analysis of Permeable Pavement on Sidewalks**. International Journal of Pavement Research and Technology, 3(4), 207-215.

WATANABE, S.; 1995. **Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes**. Water Science and Technology, vol. 32, 1, pp. 25-32.

ANEXO A – Planta do Campus Santa Mônica