



MARCOS VINÍCIUS VILELA TOMÉ

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DOS PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS**

**LAVRAS – MG
2020**

MARCOS VINÍCIUS VILELA TOMÉ

ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Civil, para
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva
Orientador

LAVRAS – MG
2020

MARCOS VINÍCIUS VILELA TOMÉ

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS
STUDY ON THE USE OF PERMEABLE PAVEMENTS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Civil, para
obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 21 de agosto de 2020.

Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva - UFLA

Prof. Dr. Paulo Roberto Borges - UFLA.

Prof. Dr. Wisner Coimbra de Paula - UFLA.



Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva
Orientador

**LAVRAS – MG
2020**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, corpo docente e todos funcionários, por proporcionarem um ambiente agradável e um ensino de qualidade.

Ao professor Keoma Defáveri do Carmo e Silva, pela orientação, paciência e disposição durante a elaboração do trabalho.

Aos meus pais, José Roberto e Wânia, por todo apoio, carinho e proteção, sem vocês ao meu lado esta conquista não seria possível.

A minha irmã, Beatriz, por estar sempre comigo, compartilhando os melhores momentos e me ensinando nos pequenos detalhes.

A todos meus amigos e colegas que estiveram presentes ao longo desses anos, vocês tornaram essa caminhada mais leve e divertida.

E a todas as pessoas que de alguma maneira estiveram presentes e contribuíram para o meu crescimento nesse período.

Muito obrigado!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Taxa de urbanização da região Sudeste e do Brasil.....	3
Figura 2 - Esquema ilustrativo sobre os eventos de cheias.	4
Figura 3 - Processos ocasionados pela urbanização.	5
Figura 4 - Efeitos da urbanização sobre o hidrograma da bacia.....	5
Figura 5 - Camadas genéricas de um pavimento.	9
Figura 6 - Origens da água na estrutura do pavimento.....	13
Figura 7 - Seção tipo de um pavimento permeável.	16
Figura 8 - Esquema com infiltração total.	17
Figura 9 - Esquema sem infiltração.....	17
Figura 10 - Esquema com infiltração parcial.....	18
Figura 11 - Acostamento de asfalto permeável.	18
Figura 12 - Estacionamento com revestimento de concreto permeável.	19
Figura 13 - Blocos de concreto vazado preenchidos com grama.	19
Figura 14 - Blocos intertravados.	20
Figura 15 - Limpeza do terreno	24
Figura 16 - Preparo do subleito	25
Figura 17 - Assentamento da geomebrana	26
Figura 18 - Assentamento da manta geotêxtil	26
Figura 19 - Tubos de dreno	27
Figura 20 - Compactação das camadas.	27
Figura 21 - Revestimento asfáltico permeável.	28
Figura 22 - Fluxograma para análise inicial da viabilidade técnica.	31
Figura 23 - Fluxograma para definição do tipo de infiltração.....	32
Figura 24 - Limitações dos pavimentos permeáveis	34
Figura 25 - Pavimento permeável com asfalto poroso e blocos vazados.	37
Figura 26 - Coeficientes de escoamento para diversos tipos de revestimento.	38
Figura 27 - Principais benefícios da utilização dos pavimentos permeáveis.	42
Figura 28 - Pavimento permeável com superfície colmatada.	44
Figura 29 - Período de manutenção dos pavimentos permeáveis por cada autor.....	46
Figura 30 - Taxa de infiltração de um pavimento permeável durante a manutenção.....	47
Figura 31 - Custos de implantação de um pavimento para diferentes revestimentos.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de infiltração do pavimento em função das condições locais.....	22
Tabela 2 - Coeficientes de escoamento para cada superfície.	36
Tabela 3 - Coeficientes de escoamento médio para as duas superfícies de estudo.	37
Tabela 4 - Características dos concretos permeáveis e convencionais de cimento Portland. ..	39
Tabela 5 - Materiais utilizados e serviços executado de cada pavimento.	41

RESUMO

Os problemas decorrentes de uma urbanização acelerada e mal planejada têm se tornado recorrentes e intensos nas grandes cidades. O aumento significativo das áreas impermeáveis vem contribuindo para maior incidência das enchentes e alagamentos. Desta forma, torna-se imprescindível uma avaliação de métodos alternativos que busquem auxiliar os sistemas de drenagem clássicos. Neste contexto, pretendeu-se com este trabalho realizar um estudo sobre a utilização dos pavimentos permeáveis como medida alternativa para controle do escoamento superficial. Para isso, um levantamento bibliográfico e documental foi realizado afim de se identificar os principais benefícios e limitações desses pavimentos em áreas urbanas. Além disso, uma análise comparativa frente aos pavimentos convencionais foi realizada, dando enfoque aos parâmetros de permeabilidade, resistência mecânica, custos e aspectos construtivos. Os resultados mostraram uma grande capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis em virtude do elevado índice de vazios de sua estrutura. No entanto, sua alta porosidade reduz sua resistência mecânica, de modo que sua utilização não se aplica a todos os tipos de tráfego, sendo adequada à maior partes das vezes para locais com poucas solicitações de cargas. Já quanto as questões construtivas, os pavimentos permeáveis se assemelham bastante aos convencionais, apresentando apenas algumas particularidades durante o dimensionamento e execução. Apesar disso, os pavimentos permeáveis se mostram uma alternativa eficiente e vantajosa, não apenas nos aspectos ambientais, como também nas questões ligadas ao conforto do usuário rodoviário.

Palavras chaves: Urbanização. Áreas impermeáveis. Pavimentos permeáveis. Execução.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1.	Urbanização: Contexto histórico	2
2.2.	Efeitos da urbanização	3
2.3.	Drenagem: medidas de controle	6
2.4.	Pavimento	9
2.5.	Materiais utilizados	10
2.6.	Processo construtivo	11
2.7.	Influência da água no pavimento	13
2.8.	Pavimentos permeáveis	15
2.9.	Tipos de pavimentos permeáveis	17
2.10.	Dimensionamento estrutural	20
2.11.	Dimensionamento hidráulico	21
2.12.	Execução do pavimento permeável	24
2.12.1.	Locação da obra	24
2.12.2.	Preparo do subleito	25
2.12.3.	Manta impermeável	25
2.12.4.	Manta geotêxtil	26
2.12.5.	Tubos de dreno	26
2.12.6.	Camadas permeáveis	27
2.12.7.	Dispositivos de drenagem	27
2.12.8.	Camada porosa de atrito	28
2.12.9.	Concreto permeável	29
2.12.10.	Blocos intertravados	29
2.12.11.	Blocos de concreto vazados	29
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1.	Aplicações e viabilidade	31
4.2.	Limitações	34
4.3.	Principais propriedades	35
4.3.1.	Índices de vazios	35
4.3.2.	Permeabilidade	35
4.3.3.	Resistência mecânica	39
4.4.	Dimensionamento e execução	40

4.5.	Benefícios	42
4.6.	Manutenção e durabilidade.....	44
4.7.	Custos de implantação	48
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais impactos que o desenvolvimento de uma área urbana provoca nos processos hidrológicos está ligado ao aumento das superfícies impermeáveis. No Brasil, as cidades cresceram sem o adequado planejamento do uso do solo. A explosão demográfica e a falta de políticas governamentais geraram uma ocupação indevida das várzeas e uma alteração nos regimes fluviais, em decorrência da retirada da cobertura vegetal e da grande impermeabilização do solo em toda área da bacia (Holtz, 2011).

Diante disso, os sistemas de drenagem clássicos que são pautados sobretudo no princípio do rápido escoamento das águas, não têm se mostrado eficientes e vantajosos de acordo com Mota (1999), haja vista que apenas transferem os problemas para o ponto a jusante da bacia hidrográfica. Neste sentido, os órgãos responsáveis e os profissionais da área se veem diante do desafio de entender os impactos negativos decorrentes da urbanização afim de buscarem soluções alternativas que possibilitem auxiliar os sistemas clássicos de drenagem.

Os novos conceitos de drenagem buscam resgatar as condições de pré urbanização através de dispositivos que permitem um acréscimo da infiltração e o aumento do tempo de retardo do escoamento superficial. De acordo com Acioli (2005), os sistemas que vêm sendo utilizados nas cidades com esse objetivo são as valas e poços de infiltração, bacias de retenção, reservatórios de retenção, telhados verdes e mais recentemente os pavimentos permeáveis.

Dentre esses sistemas, os pavimentos permeáveis se destacam pelo fato de se apresentarem como um investimento inovador e sustentável. Trata-se de um dispositivo de infiltração no qual a água escoada é desviada para as camadas do pavimento, podendo assim ser armazenada em um reservatório de britas e a partir deste direcionada para uma caixa coletora, ou simplesmente ser absorvida pelo solo. Seu armazenamento temporário faz com que os picos de cheias diminuam consideravelmente, pois os sistemas de drenagem são aliviados.

No entanto, esse sistema ainda é pouco difundido e aplicado no Brasil atual, devido ao baixo conhecimento técnico e interesse dos profissionais da área. Desta forma, esse trabalho teve como objetivo realizar um estudo sobre a utilização dos pavimentos permeáveis como alternativa sustentável e inovadora para o controle dos problemas de drenagem urbana e de infraestrutura. Aliado a isso, apresentar as principais características e propriedades desses pavimentos, bem como suas vantagens e limitações como estrutura permeável.

Ademais, buscou-se elaborar uma análise comparativa entre os pavimentos permeáveis e os pavimentos convencionais, mostrando suas semelhanças e peculiaridades quanto ao dimensionamento, aos métodos construtivos, aos materiais empregados e aos custos de execução.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Urbanização: Contexto histórico

Importantes cidades e sistemas urbanos foram se expandindo ao longo do tempo, como na Grécia Antiga e no Império Romano. Entretanto, o mundo ainda permaneceria predominantemente rural por muitos séculos, uma vez que os povos encontravam subsistência através das atividades manuais agrárias. O processo de urbanização generalizada na história da humanidade pode ser considerado um fenômeno recente. Em termos globais, no ano de 1800 somente 3% da população mundial era urbana, já em 1900 a população vivendo em cidades chegava a 14%, alcançando aproximadamente 38% somente no ano de 1970 (BECKER, 2010).

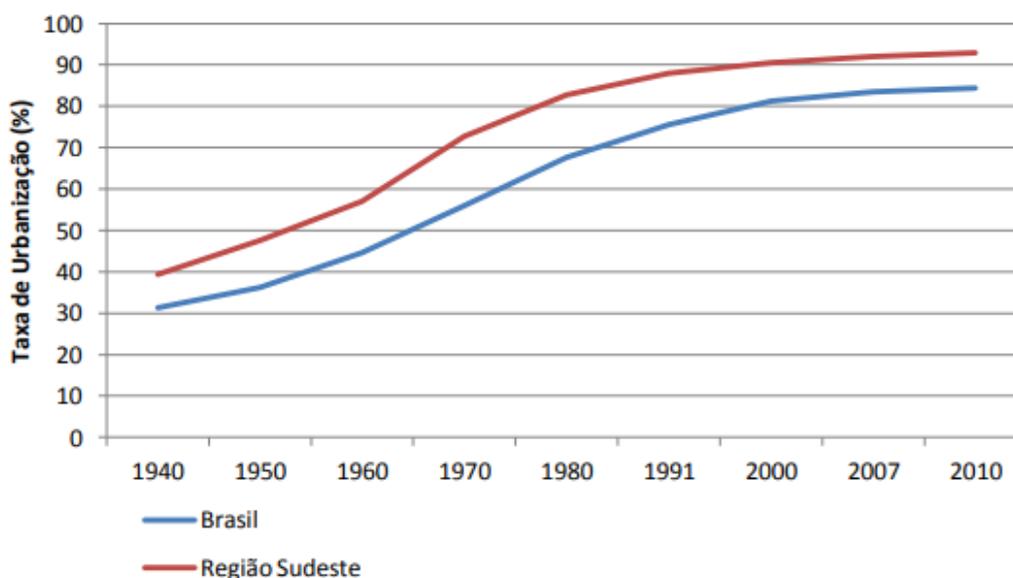
Foi a partir do século XX, com o ápice da Revolução Industrial na Europa que a urbanização aumentou progressivamente. As cidades eram essenciais para o processo de acumulação de capital, dessa forma se fazia necessário a aglomeração de pessoas para a mão de obra, intensificando o chamado Êxodo Rural. Tal fato corresponde ao processo de migração em massa da população do campo para as cidades, devido a mecanização das tarefas agrárias e a expansão das indústrias (BECKER, 2010).

A partir da metade do século XX, principalmente no pós-guerra, onde os investimentos no setor agrícola, especialmente no cafeeiro, deixaram de ser rentáveis, passou-se a empregar mais investimentos no setor industrial. Segundo Mota (1999), é importante destacar que no Brasil, bem como nos países subdesenvolvidos, o processo de urbanização se deu de maneira desorganizada e contínua.

De acordo com Batezini e Balbo (2015) o crescimento da população urbana no Brasil, com destaque para a região sudeste, por se tratar do principal centro econômico do país, vem acontecendo sobretudo na periferia das metrópoles, através da ocupação de áreas mananciais e de preservação ambiental. Conseqüentemente, há um crescimento considerável no risco de inundações e escorregamentos de terra nessas regiões.

O censo demográfico do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) de 2010 aponta um grau de urbanização de aproximadamente 85% no Brasil e 93% na região Sudeste. A partir de 1970, é possível observar pela Figura 1 que a população urbana superou a rural no país, já na região sudeste, a população urbana ultrapassou a rural em mais de 50% um pouco mais cedo, no ano de 1960.

Figura 1- Taxa de urbanização da região Sudeste e do Brasil.



Fonte: IBGE (2010).

Para Mota (1999), o aumento progressivo da população e o crescimento das cidades devem estar sempre alinhados ao desenvolvimento de toda infraestrutura urbana, para que todos habitantes possam ter uma condição mínima de sobrevivência. No entanto, na maioria das vezes esse desenvolvimento não acontece, visto que o processo ocorre a partir de um planejamento inadequado e tardio, o que acarreta em um crescimento desordenado e conseqüentemente em maiores problemas de drenagem urbana nas cidades.

2.2. Efeitos da urbanização

Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) apontam que essa falta de planejamento na ocupação das áreas urbanas resulta em alterações significativas nas taxas de impermeabilização das bacias, ocasionando transtornos e prejuízos em razão do aumento significativo das enchentes, inundações e alagamentos.

Tais alterações do meio físico reduzem a infiltração e aumentam os volumes de escoamento superficial das águas da chuva, desafiando as redes de drenagem pluvial e sobrecarregando os corpos d'água que cortam as cidades, ampliando dessa maneira os picos de cheia e causando prejuízos ambientais, sociais e econômicos (Holtz, 2011).

As enchentes são fenômenos de origem natural que ocorrem frequentemente nos cursos d'água em função de chuvas intensas. Apesar de serem naturais, a intervenção humana tem contribuído bastante para as ocorrências nas grandes cidades, segundo Bertoni e Tucci (2003). De acordo com Canholi (2005), as enchentes podem ser entendidas como o acréscimo de vazão

devido ao escoamento superficial provenientes das precipitações nos canais pluviais, sem que haja o transbordamento do leito maior.

Quando há esse extravasamento, é correto dizer que ocorreu uma inundação, que nada mais é que a enchente atingindo uma área antropizada (GOERL; KOBAYAMA, 2005). Esse fenômeno ocorre pela conjunção de diversos fatores, como o comportamento natural dos rios, a urbanização, a impermeabilização das superfícies e a canalização dos cursos d'água (BERTONI; TUCCI, 2003).

Além das enchentes e inundações, podem ocorrer também os eventos denominados de alagamentos, que são caracterizados pelo acúmulo de água das chuvas nas margens das ruas e estradas, mas não pelo extravasamento do curso d'água, e sim pela dificuldade de infiltração e escoamento da água, causados pela deficiência no sistema de drenagem pluvial. O esquema ilustrativo da Figura 2 mostra de maneira simples a diferenças entre esses eventos (GOERL; KOBAYAMA, 2005).

Figura 2 - Esquema ilustrativo sobre os eventos de cheias.

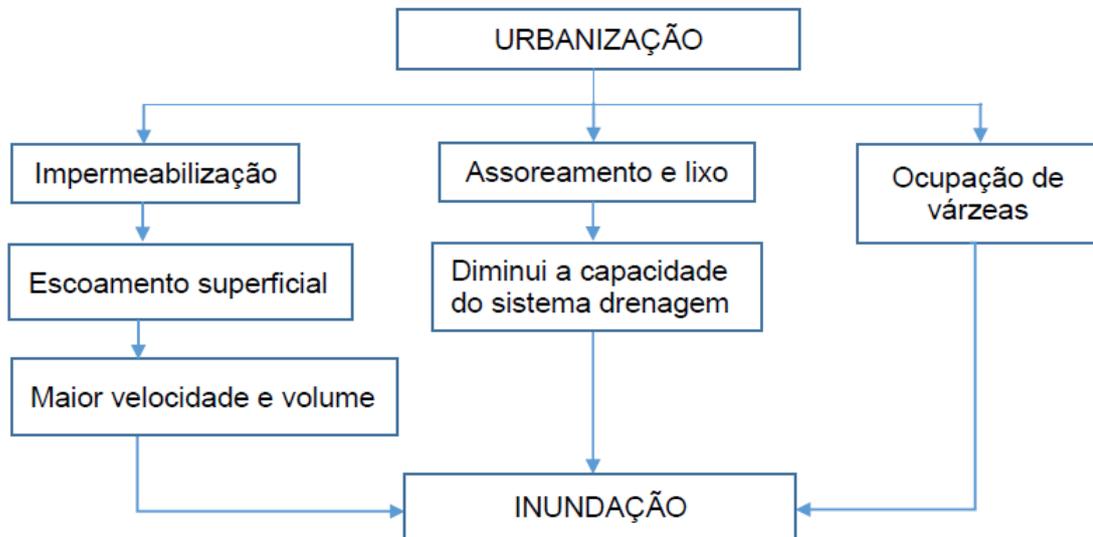


Fonte: Goerl e Kobayama (2005).

O gerenciamento de resíduos sólidos é outra questão que está intimamente ligada ao bom funcionamento do sistema de drenagem urbana. Constantemente tais resíduos são despejados de maneira irregular em rios, córregos, terrenos vazios e nas ruas. Logo, a falta de uma coleta seletiva do lixo produzido pelas ações antrópicas pode provocar danos indesejáveis ao meio ambiente, como assoreamento de rios e córregos, destruição das áreas verdes e obstrução de bocas de lobo e galerias de águas pluviais, todos com graves consequências na drenagem urbana e na qualidade de vida da população (ÁBALOS *et. al.*, 2012).

Todos esses fatores decorrentes de uma urbanização mal planejada, contribuem diretamente para os problemas de drenagem urbana, pois acentuam a ocorrência das enchentes, inundações e alagamentos, como pode ser observado no esquema da Figura 3.

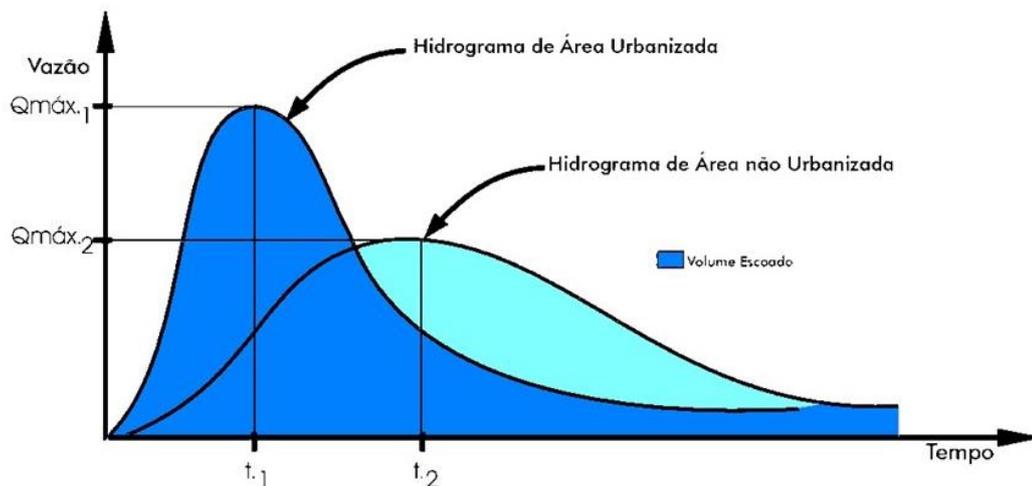
Figura 3 - Processos ocasionados pela urbanização.



Fonte: Silva e Poletto (2017).

Associado a esses fatores, pode-se verificar através do hidrograma (gráfico que relaciona a vazão de uma determinada bacia hidrográfica com o tempo) representado na Figura 4, que os picos de cheia depois da urbanização passam a ocorrer mais cedo e com mais intensidade do que antes, quando as características de uso e ocupação favoreciam a infiltração. Desta forma o sistema de drenagem se torna sobrecarregado, fazendo com que os fenômenos das enchentes e alagamentos ocorram com mais frequência e severidade (VIRGILLIS, 2009).

Figura 4 - Efeitos da urbanização sobre o hidrograma da bacia.



Fonte: Virgillis (2009).

É evidente que o processo de urbanização gera impactos tanto ambientais como sociais, no entanto, esses efeitos podem ser evitados ou ao menos minimizados mediante a um processo eficaz de planejamento urbano (MOTA, 1999).

2.3. Drenagem: medidas de controle

Para evitar os problemas provenientes da drenagem urbana, as grandes cidades do Brasil e do mundo precisam de soluções alternativas estruturais e não estruturais, que de acordo com Canholi (2005) se baseiam em conhecimentos da dinâmica ambiental, climatológica e hidrológica. Além disso, componentes sociais e políticos-institucionais que considerem o planejamento de drenagem, as obras de infraestrutura e o planejamento urbano, os quais precisam ser analisados de forma conjunta nos projetos de drenagem das cidades.

As alternativas estruturais são medidas que buscam reduzir o risco de ocorrência de enchentes, pela implantação de obras para conter e/ou melhorar a condução dos escoamentos. Trata-se, portanto, de obras de engenharia voltadas para a correção dos danos naturais, como construção de barragens, diques, canalizações, dentre outras (SUDERSHA, 2002). Apesar de serem de extrema importância para a solução de grande parte dos problemas, tais medidas possuem altos custos de implantação e manutenção, além de apenas transferirem o inconveniente para as partes mais baixas das cidades (BERTONI; TUCCI, 2003).

Em contrapartida, as medidas não estruturais buscam reduzir os danos ou as consequências das inundações, não por meio de obras, mas sim pelo estabelecimento de diretrizes, tais como limpeza urbana, aumento de áreas verdes, manutenção das áreas permeáveis, zoneamento das áreas de risco e educação ambiental (SUDERSHA, 2002).

De acordo com Canholi (2005), tais medidas defendem na sua concepção a melhor convivência da população com esses eventos, não sendo projetadas para dar total proteção, já que para isso seria necessário prever o maior evento possível e superdimensionar todas estruturas. Desta forma, as medidas estruturais e não estruturais precisam estar associadas, para assim oferecerem soluções mais eficazes e completas para os problemas de drenagem urbana.

Ademais, de acordo com Baptista e Nascimento (2002), as medidas não estruturais se encaixam muitas vezes como tecnologias alternativas, por buscarem compensar sistematicamente os efeitos da urbanização como um todo. Essa compensação é feita pelo controle do excesso de água oriunda da impermeabilização, evitando assim sua transferência rápida para jusante.

Canholi (2005) destaca ainda duas diretrizes gerais para os projetos de drenagem urbana, classificando-as em “conceito de canalização” e “conceito de reservação”, ou de maneira mais elementar em drenagem clássica e drenagem sustentável.

O sistema clássico refere-se à prática da canalização convencional, praticado há décadas no Brasil e no mundo. Essa técnica possui como referência os preceitos higienistas de drenagem, os quais recomendam um rápido escoamento das águas pluviais nas áreas urbanas, por meio de condutos que funcionam por gravidade. São constituídos por dispositivos de microdrenagem como sarjetas, bocas de lobo, galerias ou canais abertos, os quais realizam o transporte, captação e desague das águas pluviais (CANHOLI, 2005).

No entanto, ao longo da segunda metade do século XIX, com a intensificação do processo de urbanização, o sistema de drenagem clássico começou a apresentar limitações em seu funcionamento, visto que a transferência rápida das águas para jusante causava inundações nesses pontos, tornando o sistema ineficiente. Com isso, outro conceito para tratar dos problemas de drenagem foi desenvolvido, o de “reservação”, também chamado de tecnologias alternativa, que buscam amenizar os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico (CANHOLI, 2005).

Virgiliis (2009) ressalta que essas tecnologias são alternativas por considerarem o impacto da urbanização em um contexto geral, buscando compensar seus efeitos pelo controle do excesso de água proveniente da impermeabilização, evitando sua transferência rápida para jusante, ou seja, utiliza-se o princípio de promover a infiltração da água no solo, não a repassando aos sistemas de escoamento urbano.

Desta maneira, Acioli (2005) e Virgiliis (2009) citam algumas medidas alternativas, que podem ser classificadas também como não estruturais, as quais podem contribuir para minimizar as enchentes e inundações nos grandes centros, sendo elas:

- a) **Áreas verdes urbanas:** proporcionam um equilíbrio entre o ambiente urbano e o natural, diminuindo consideravelmente os efeitos das ilhas de calor, contribuindo para uma melhora na qualidade de vida da população (SILVA e POLETO, 2017).
- b) **Telhado verde:** consiste em uma camada de vegetação e uma camada drenante, as quais são colocadas nos telhados das construções, reduzindo a temperatura da edificação e colaborando para a expansão da área verde nas cidades (SILVA e POLETO, 2017).

- c) **Valas de infiltração:** também denominadas valetas de infiltração, as valas são dispositivos de drenagem lateral, frequentemente empregados paralelos às ruas, estradas e estacionamentos. Esses dispositivos concentram o fluxo das áreas próximas e propiciam condições para que a infiltração ocorra ao longo do seu comprimento, reduzindo o escoamento superficial direto (TUCCI, 1998).
- d) **Poços de infiltração:** consiste em um pequeno fosso, geralmente preenchido com cascalho ou brita, o qual é concebido para armazenar e conceder uma lenta infiltração das águas no terreno. Sua principal aplicação é no controle do escoamento das águas de chuva provenientes dos telhados das edificações. Essa água é direcionada pela superfície ou rede de drenagem, sendo então armazenada para que na sequência ocorra a infiltração no solo, recarregando assim o lençol freático (SILVA e POLETO, 2017).
- e) **Reservatórios de detenção e retenção:** são dispositivos utilizados para armazenar águas pluviais por um período de tempo, reduzindo assim os problemas de enchentes durante as chuvas. Possuem como vantagem o aspecto de que podem ser instalados em área públicas, como praças e parques, onde terão outras finalidades após a precipitação (SILVA e POLETO, 2017).
- f) **Pavimentos permeáveis:** dispositivos de infiltração nos quais o escoamento superficial é desviado através de uma superfície porosa para dentro de um reservatório de pedras, localizado logo abaixo da camada do revestimento. Seu armazenamento temporário faz com que o sistema de drenagem não sobrecarregue e que os picos de cheias diminuam consideravelmente. Além do mais, apresenta melhor custo benefício em relação as outras medidas alternativas (SILVA e POLETO, 2017).

Essas são algumas das medidas alternativas mais utilizadas para mitigar os problemas de drenagem urbana nas grandes cidades. Neste trabalho os pavimentos permeáveis terão maior relevância e serão estudados com mais detalhes, visto que sua utilização tem crescido muito nos últimos anos devido ao fato de se apresentarem como um investimento inovador e eficaz (STORCK, 2017).

No entanto, para entender melhor seus benefícios e aplicações, é imprescindível a realização de um estudo inicial sobre os pavimentos impermeáveis/convencionais, os quais são amplamente utilizados há séculos em todo o mundo. Desta maneira, é possível estabelecer parâmetros e critérios para a realização de análises comparativas precisas e convincentes sobre as vantagens e limitações dos pavimentos permeáveis.

2.4. Pavimento

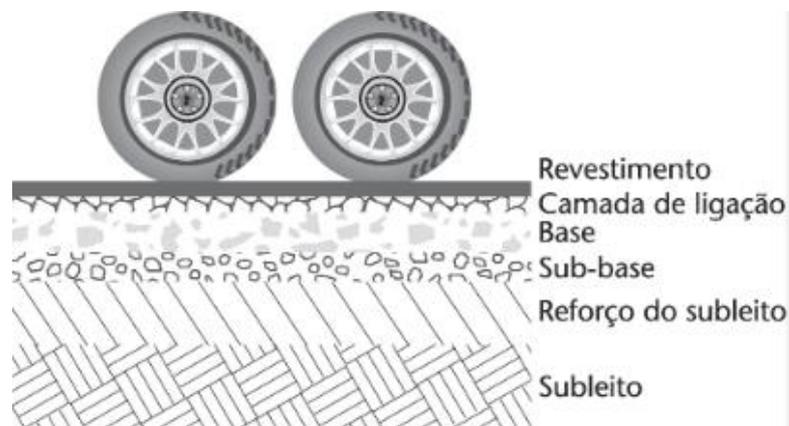
O pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada econômica e tecnicamente a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego, além de melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança. Sua estrutura pode variar quanto à espessura, aos materiais empregados e a função que a via irá exercer (SENÇO, 2001).

Segundo Balbo (2007), as funções dos pavimentos são: apresentar uma superfície regular, garantindo o conforto das pessoas no deslocamento dos veículos, uma superfície mais aderente, garantindo maior segurança em condições de pista úmida ou molhada e uma superfície menos ruidosa diante da ação dinâmica dos pneumáticos.

Para Danieleski (2004), o pavimento possui como objetivos principais: conforto de rodagem, capacidade de suportar cargas previamente dimensionadas, segurança e conforto visual. Dessa forma, sob o parecer técnico e do usuário, um pavimento adequado é aquele cuja superfície de rolamento esteja apropriada, suportando cargas, possuindo ligação segura entre pneu e superfície, tanto no rolamento quanto na frenagem e possuindo ainda uma aparência agradável durante o trajeto.

O pavimento é composto por camadas finitas e sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito, adequada para atender estruturalmente e operacionalmente o tráfego, de forma durável e ao mínimo custo possível, considerando os serviços de manutenção e reabilitação obrigatórios (BALBO, 2007). A Figura 5 apresenta a divisão das camadas de um pavimento rodoviário na forma mais completa.

Figura 5 - Camadas genéricas de um pavimento.



Fonte: Manual de técnicas de pavimentação (SENÇO, 2001).

- a) **Subleito:** é a camada mais interna do pavimento, sendo considerada a fundação da estrutura, ou seja, é o material natural da região onde se pretende inserir o pavimento. Em estradas que possuem tráfego há algum tempo e se pretende pavimentar, se faz necessário uma camada de regularização, visto que sua superfície se encontra desnivelada (BALBO, 2007).
- b) **Reforço do subleito:** é a camada com espessura variável executada sobre o subleito, quando se faz necessário reduzir por razões econômicas a espessura da sub-base e da base, originada pela baixa capacidade do subleito (BALBO, 2007).
- c) **Sub-base:** é a camada que complementar a base quando não for aconselhável construir em cima do subleito ou do reforço do subleito, por orientação de projeto, tendo características tecnológicas superiores às do material de reforço (SENÇO, 2001).
- d) **Base:** é a camada de pavimentação destinada a receber os esforços verticais do tráfego e distribuí-los as camadas subjacentes. Caso a qualidade da base não seja tão boa, o pavimento tem grandes chances de sofrer deteriorações (BALBO, 2007).
- e) **Revestimento:** é a camada que recebe cargas verticais e horizontais oriundas do tráfego, transmitindo as camadas subjacentes. Além de melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, resistirá também aos desgastes. Pode ainda ser dividida em camada de rolamento e camada de ligação, que são destinadas a promoverem uma maior aderência com os agregados da base (BALBO, 2007).

Dependendo do caso, o pavimento poderá não possuir camada de sub-base ou de reforço, porém a existência da camada de revestimento e de base, além do subleito (fundação) são condições mínimas para que a estrutura seja denominada de pavimento (SENÇO, 2001).

Segundo Balbo (2007), as tensões nos pavimentos são aliviadas com a profundidade, ou seja, os esforços nos pavimentos atuam com maior magnitude nos estratos superiores, desta forma a utilização de materiais de melhor qualidade nessas camadas se torna essencial.

2.5. Materiais utilizados

De acordo com Bernucci *et. al.* (2008), os materiais empregados na pavimentação podem variar conforme o tipo de pavimento e os tipos de camadas necessárias para cada obra. Para a escolha dos materiais que serão utilizados, empregam-se métodos de seleção e caracterização de suas propriedades. A seleção consiste em uma etapa preliminar para verificar os materiais disponíveis próximos a região, considerando a dificuldade de exploração e os

gastos com transporte. Do contrário, deve-se realizar um estudo sobre as alternativas mais viáveis, visando sempre a minimização dos custos.

Para a caracterização dos agregados utiliza-se uma tecnologia tradicional, pautada principalmente na distribuição granulométrica, na resistência, forma e durabilidade dos grãos. Usualmente eles devem se apresentar resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura (BERNUCCI *et. al.*, 2008).

De maneira geral, os materiais empregados podem ser classificados quanto ao comportamento frente aos esforços em: materiais granulares e solos, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos (BERNUCCI *et. al.*, 2008).

Entende-se por materiais granulares aqueles que não possuem coesão e que trabalham sobretudo aos esforços de compressão. Os solos coesivos por sua vez, resistem à compressão e também à tração de pequena magnitude, devido a fração fina presente na sua composição. Os materiais empregados para pavimentação nessa classe são: brita graduada simples (BGS), brita ou bica corrida, macadame hidráulico e a seco, solo-agregado e outros (BERNUCCI *et. al.*, 2008).

Já os cimentados são os materiais granulares ou os solos que recebem adição de cimento, cal ou qualquer outro aditivo, proporcionando um aumento da sua resistência à tração e à compressão, além de um acréscimo significativo da sua rigidez. Os materiais usados são: brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo-cimento, solo-cal e outros (BERNUCCI *et. al.*, 2008).

Por fim, as misturas asfálticas e solo-asfalto, nos quais a ligação entre agregados ou partículas é dada pelo ligante asfáltico, sendo a resistência à tração bastante superior aos solos argilosos e, por isso, são enquadrados em classe diferente dos solos e dos materiais cimentados, sendo os principais: solo-asfalto, macadame betuminoso, solo emulsão e outros (BERNUCCI *et. al.*, 2008).

2.6. Processo construtivo

Antes de se iniciar a construção de qualquer tipo de pavimento deve-se realizar estudos preliminares acerca dos custos, alternativas e viabilidade da obra na região. A partir disso, é feita uma análise do tráfego e uma caracterização do material do subleito, através de sondagens, ensaios de compactação, de resistência dentre outros. Desta forma é possível definir a qualidade do solo e assim projetar um pavimento compatível com a solicitação imposta pelo tráfego (BALBO, 2007).

Após todas essas etapas e com projeto executivo finalizado, inicia-se o processo construtivo propriamente dito, que segundo Balbo (2007), pode ser dividido resumidamente nas seguintes etapas:

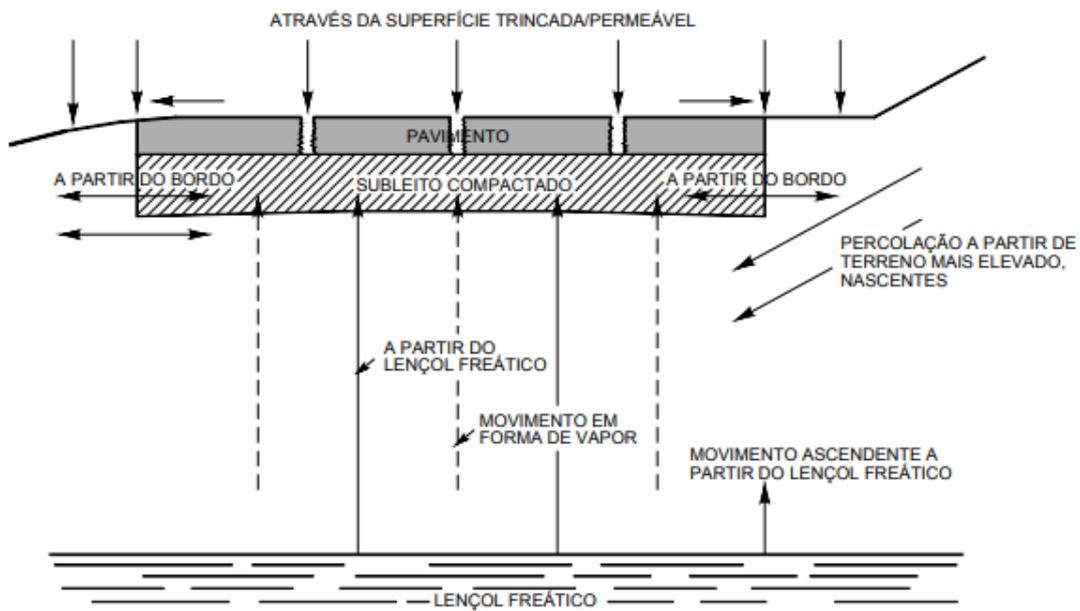
- a) **Serviços preliminares:** processo no qual é feito a limpeza do terreno, através da remoção de plantas, arbustos e outras vegetações superficiais. É fundamental que a região esteja preparada para a construção das camadas do pavimento (VIRGILIIS, 2009).
- b) **Regularização do subleito:** com as informações dos níveis e cotas obtidos no levantamento topográfico, inicia-se o processo de terraplanagem para a regularização do subleito. Esse procedimento irá garantir o nivelamento do terreno para a construção das camadas dos pavimentos, através dos serviços de escavação, carregamento, transporte, espalhamento e compactação do solo (BALBO, 2007).
- c) **Reforço do subleito:** essa camada deve ser empregada quando o solo do subleito apresentar baixa resistência aos esforços provenientes do tráfego na região. Quando isso ocorrer, deve-se empregar uma camada sobre o subleito com um solo de melhor qualidade, fazendo com que o subleito receba pressões de menor magnitude, as quais serão compatíveis com a sua resistência (BALBO, 2007).
- d) **Construção da sub-base e da base:** inicialmente deve-se realizar uma mistura prévia dos materiais que serão utilizados nessas camadas. A partir disso, o material é transportado e depositado na pista em montes adequadamente espaçados, sendo feito assim um espalhamento homogêneo com uma motoniveladora. É importante realizar a correção do teor de umidade do material, através dos processos de umidificação ou secagem, para então dar início aos serviços finais de compactação e acabamento. O grau de compactação especificado é atingido determinando o número de passadas necessárias dos equipamentos de compactação (DNIT, 2010).
- e) **Imprimação e pintura de ligação:** a execução da imprimação e da pintura de ligação consiste no fornecimento e aplicação de uma camada de material betuminoso sobre a superfície de uma base concluída, antes da execução de um revestimento betuminoso qualquer. A imprimação confere coesão superficial, impermeabilização da superfície e permite condições de aderência entre a base e o revestimento a ser executado. Já a pintura de ligação tem o propósito de oferecer apenas aderência (DNIT, 2012/2014).
- f) **Revestimento:** se trata da última etapa do processo executivo dos pavimentos, sendo a camada destinada a receber diretamente a ação do tráfego. Sua execução apresenta peculiaridades a depender do tipo de revestimento utilizado, mas de maneira geral é uma

etapa que exige grande controle de qualidade. O material deve ser espalhado na pista de maneira uniforme para posterior compactação, através de um maquinário adequado. Sua compactação deve ser bem executada a fim de se evitar problemas como deformação, fissuras, buracos dentre outros (BALBO, 2007).

2.7. Influência da água no pavimento

Para Suzuki, Azevedo e Kabbach (2013), um dos principais problemas relacionados ao mau desempenho dos pavimentos é na aplicação de cargas do tráfego quando os materiais presentes nas camadas se encontram saturados. Essa entrada de água nas camadas do pavimento pode ser resultante de diversas fontes e formas, tais como: infiltração superficial através de trincas, juntas, bordas e outros defeitos que facilitem a entrada, percolação ascendente pelo lençol freático alto, capilaridade e movimentos em forma de vapor, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Origens da água na estrutura do pavimento.



Fonte: Suzuki, Azevedo e Kabbach (2013).

A movimentação do vapor de água está associada às variações de temperatura e de outras condições climáticas envolvendo as estações do ano. No entanto, essa quantidade que infiltra é praticamente desprezível quando se comparada com as provenientes das demais fontes, não provocando alterações significativas no desempenho das estruturas dos pavimentos se analisadas separadamente (PEREIRA, 2003).

As outras fontes de infiltração mencionadas são capazes de fornecer volumes de água suficientes para gerar um volume de água livre dentro da estrutura. A percolação dessa água nas camadas é dada de maneira ilimitada, obedecendo apenas as leis da hidráulica, tornando-se uma das principais causas de degradação precoce dos pavimentos (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH, 2013).

As precipitações pluviométricas são a maior fonte de águas que penetram nas estruturas do pavimento, podendo ocasionar infiltrações tanto pela superfície quanto pelas bordas da pista, na junção da pista com o acostamento (PEREIRA, 2003).

A quantidade de água que infiltra através da superfície do pavimento é função da quantidade e capacidade de vazão das trincas, da área que cada junta drena e da duração das chuvas na região (RIDGEWAY, 1976 citado por PEREIRA, 2003). Assim, mensurar a quantidade que infiltra pela superfície é uma tarefa complicada e imprecisa, pois além desses fatores mencionados, Suzuki, Azevedo e Kabbach (2013), consideram outros parâmetros importantes, como declividade superficial, permeabilidade da camada de base e capacidade de remoção da água pelo sistema de drenagem subsuperficial, caso exista.

Existem dois mecanismos que influenciam diretamente na infiltração da água pelas bordas do pavimento, a variação da carga hidráulica e a capilaridade. Em rodovias que não apresentam acostamento revestido, há uma grande tendência de ocorrer uma infiltração horizontal para o interior do pavimento, pois uma parcela de precipitação vai infiltrar nessa área com maior facilidade, por se tratar de uma área muitas vezes permeável, o que gera o enfraquecimento da estrutura e conseqüentemente uma redução da sua vida útil (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH, 2013).

A infiltração por capilaridade ocorre nos poros do solo sobre a linha de saturação devido à ação da tensão superficial. Mesmo o solo estando devidamente compactado, ainda haverá pequenos espaços vazios que estão comunicando entre si em todas direções, formando uma rede de tubos capilares tortuosos. Se uma massa de solo nessas condições tem sua parte inferior exposta a água, imediatamente ela irá subir por esses vasos até uma determinada altura, deixando essa porção de solo saturada (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH, 2013).

Ainda que os danos causados pela presença da água livre nas camadas não apareçam de forma imediata, essa água que infiltra em excesso exerce influência sobre o desempenho dos materiais constituintes da estrutura do pavimento que, com decorrer do tempo podem levar a uma perda de funcionalidade (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH, 2013).

Segundo Pereira (2003), é possível verificar uma grande correlação no aumento e na severidade dos defeitos em pavimentos, com o acréscimo do teor de umidade na estrutura em

função da presença de água livre. Além disso, Suzuki, Azevedo e Kabbach (2013), destacam que as solicitações do tráfego na estrutura irão produzir danos superiores em relação aos períodos em que a estrutura se encontra seca, pois o surgimento de poro-pressões elevadas acarreta numa diminuição da capacidade de suporte dos materiais granulares.

Além do mais, a pressão hidrodinâmica elevada gerada pelo movimento do tráfego leva a uma perda de suporte do subleito, fazendo com que haja um bombeamento dos finos da base granular, ou seja, o material do subleito sobe para as demais camadas devido a presença de água e com isso os grãos finos ocupam os vazios das camadas e alteram a rigidez de toda estrutura (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH, 2013).

Desta forma, tentar manter a água totalmente fora do pavimento é a primeira solução encontrada para minimizar os efeitos danosos causados pela presença da umidade em excesso. Para isso, seria necessário dimensionar as camadas para resistirem aos carregamentos na presença de água, utilizar materiais inertes e/ou realizar uma impermeabilização totalmente eficaz em toda estrutura (PEREIRA, 2003).

A primeira alternativa se tornaria inviável pois promoveria uma estrutura extremamente volumosa e superdimensionada. Já a utilização de uma estrutura apenas com materiais inertes seria uma solução de difícil execução, pois os materiais utilizados ficariam dependentes das características geológicas da região. E a completa impermeabilização seria um processo praticamente impossível, visto a complexidade de se controlar todas as fontes de entrada de água, além de ser uma técnica muito cara (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH, 2013).

Neste contexto o uso dos pavimentos permeáveis se torna uma excelente alternativa para os problemas de perda do suporte da estrutura na presença de água, pois suas camadas são dimensionadas e projetadas para resistirem aos esforços mecânicos e funcionarem como estruturas permeáveis. Como resultado, a água que penetra nos pavimentos sob diversas formas irá infiltrar no subleito se o volume for baixo, recarregando assim o lençol freático. Do contrário, será drenada transversalmente e lançada nos condutos longitudinais, evitando assim a saturação do solo e conseqüentemente a perda de sua funcionalidade (PEREIRA, 2003).

2.8. Pavimentos permeáveis

O pavimento permeável pode ser classificado como um dispositivo de infiltração, pois caracteriza-se por possuir propriedades que viabilizam a passagem de água e ar em sua estrutura, fazendo com que o escoamento seja desviado através da sua camada superficial porosa, segundo Gonçalves e Oliveira (2014).

Desta forma, os pavimentos permeáveis podem ser definidos como aqueles que possuem espaços livres em sua estrutura por onde a água possa escoar, podendo infiltrar no solo ou ser transportada por algum sistema auxiliar de drenagem. Tais pavimentos visam reduzir o volume de água referente ao escoamento superficial, fazendo com que o sistema de drenagem urbana fique menos solicitado e com isso a probabilidade de inundações diminua consideravelmente (FERGUSON, 2005 citado por GONÇALVES; OLIVEIRA, 2014).

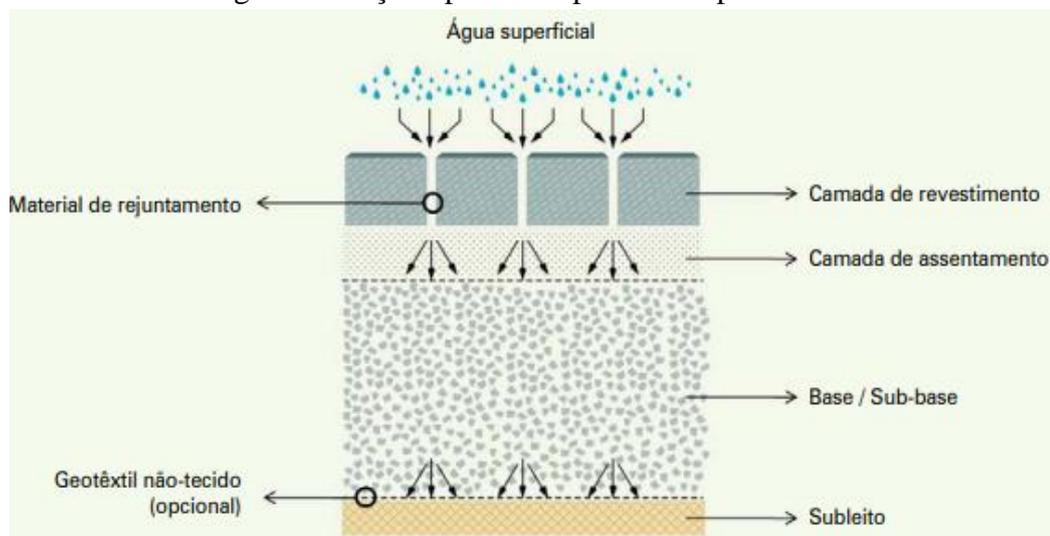
Para Acioli (2005), o pavimento permeável consiste em um pavimento onde não existem os agregados finos, ou seja, as partículas menores que 0,6 mm não devem estar presente na sua estrutura, fazendo com que os agregados fiquem com vazios de aproximadamente 40%, permitindo assim a passagem do fluido.

Os pavimentos cujo teor de vazios é baixo, e que possuem taxa de infiltração pequena, não são considerados permeáveis. Para receberem tal classificação, eles precisam apresentar porosidade e permeabilidade significativamente elevadas, de modo a influenciar a hidrologia e causar algum efeito positivo para o meio ambiente (VIRGILIIS, 2009).

Segundo Acioli (2005), o funcionamento hidráulico dos pavimentos permeáveis se fundamenta basicamente em três etapas: entrada da água de forma distribuída pelo revestimento, estocagem temporária nos vazios das camadas e evacuação gradual, que é feita por infiltração no solo, por tubos de drenagem, ou por uma combinação dos dois.

Na Figura 7 é possível observar a seção tipo de um pavimento permeável utilizando peças pré-moldadas de concreto como material de revestimento.

Figura 7 - Seção tipo de um pavimento permeável.



Fonte: Marchioni e Silva (2011).

2.9. Tipos de pavimentos permeáveis

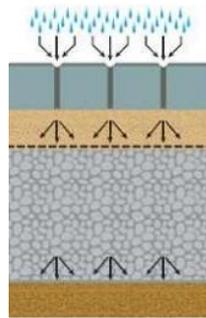
Os pavimentos permeáveis podem ser classificados, de maneira geral, tanto em relação a sua granulometria quanto à destinação final da água, segundo Bernucci *et. al.* (2008). Existem três sistemas de classificação para os pavimentos permeáveis em relação a infiltração da água.

A escolha do sistema apropriado está relacionada diretamente com o grau de permeabilidade do solo e com o risco de contaminação do lençol freático na região (BERNUCCI *et. al.*, 2008). Sendo assim, podem ser divididos em:

a. Pavimento com infiltração total

Nesse caso, todo o volume de água coletado infiltra no solo, sendo este o único meio de saída, como pode ser visto na Figura 8. Pavimento implantado quando o solo do subleito apresenta alta permeabilidade e quando o nível do lençol freático for baixo (VIRGILIS, 2009).

Figura 8 - Esquema com infiltração total

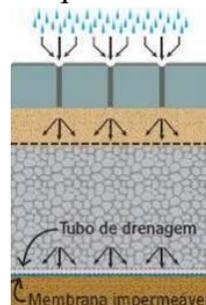


Fonte: Marchioni e Silva (2011).

b. Pavimento sem infiltração

Nesta situação, todo o volume de água é coletado por sistemas de drenagem com tubos perfurados, os quais conduzem todo o volume escoado para a rede de drenagem (Figura 9). Utilizado quando o solo do subleito possui pouca permeabilidade e/ou o nível do lençol freático da região encontra-se com risco de contaminação (GONÇALVES; OLIVEIRA, 2014).

Figura 9 - Esquema sem infiltração

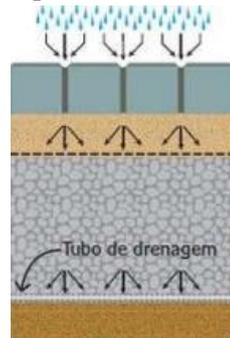


Fonte: Marchioni e Silva (2011).

c. Pavimento com infiltração parcial

Sistema intermediário aos demais, pois nesse caso as condições do solo ou do lençol freático são medianas, sendo necessário um sistema complementar de coleta por drenos, para que o volume excedente de água, ou seja, a parcela que não foi infiltrada no sub leito, possa ser encaminhada para a rede coletora, como representado na Figura 10 (VIRGILIIS, 2009).

Figura 10 - Esquema com infiltração parcial



Fonte: Marchioni e Silva (2011).

Além da classificação direcionada para o aspecto hidráulico, os pavimentos permeáveis podem ser divididos de acordo com sua granulometria. A escolha do material de revestimento a ser utilizado está relacionado com a disponibilidade do material, bem como a estética da estrutura, podendo ser separados em:

a. Pavimento de asfalto permeável

Neste tipo de pavimento, conforme indicado na Figura 11, a camada superior é composta de forma semelhante à dos pavimentos convencionais, porém com a diferença de que a fração de areia fina da mistura dos agregados é retirada, sendo denominada camada porosa de atrito (CPA). Essa graduação resulta em uma mistura asfáltica que pode conter de 18% a 25% de vazios, permitindo assim uma rápida percolação da água (BERNUCCI et. al, 2008).

Figura 11 - Acostamento de asfalto permeável.



Fonte: Marchioni e Silva (2011).

b. Pavimento de concreto permeável

A camada superior do concreto permeável é composta a partir de conceito similar ao do CPA, com retirada da fração fina dos agregados, sendo que os mesmos precisam ter graduação uniforme para que a passagem da água não seja obstruída. A diferença básica entre eles consiste no material empregado, que nesse caso é o cimento, como mostra a Figura 12. Quando aplicado sobre as camadas da estrutura do pavimento, resulta numa placa rígida, por isso não deve ser utilizado em subleitos fracos, pois a movimentação da estrutura como um todo poderá gerar trincas no revestimento (FERGUSON, 2005).

Figura 12 - Estacionamento com revestimento de concreto permeável.



Fonte: Marchioni e Silva (2011).

c. Pavimento de blocos de concreto vazado

Os blocos de concreto vazado são assentados sobre material granular, como areia, e preenchidos com agregados ou vegetação do tipo rasteira, como grama. São colocados lado a lado, resultando numa superfície semelhante a uma grelha, como pode ser visto na Figura 13. Neste tipo de pavimento é de fundamental importância a colocação de filtros geotêxteis sob a camada granular para prevenir o carreamento de areia fina para as camadas inferiores (GONÇALVES e OLIVEIRA, 2014).

Figura 13 - Blocos de concreto vazado preenchidos com grama.



Fonte: Marchioni e Silva (2011).

d. Pavimento de blocos de concreto e paralelepípedo

Os blocos intertravados de concreto também possuem boa permeabilidade, entretanto sua magnitude depende da granulometria do material de assentamento e de suas juntas. A permeabilidade desse tipo de pavimento, que já é menor que a dos demais, diminui com o tempo, devido ao tráfego de veículos, podendo chegar à metade do valor original após um período médio de cinco anos, segundo Gonçalves e Oliveira (2014). A Figura 14 mostra um exemplo de pavimentação utilizando esses blocos.

Figura 14 - Blocos intertravados.



Fonte: Virgiliis (2009).

2.10. Dimensionamento estrutural

O dimensionamento de um pavimento consiste basicamente na determinação das espessuras e dos materiais que serão utilizados nas camadas de sua estrutura, visando suportar as cargas solicitadas pelo tráfego e oferecer uma serventia satisfatória. Atualmente no Brasil o método mais empregado é o proposto pelo engenheiro Murilo Lopes Souza, na década de 70, conhecido como Método do CBR ou Método do DNER, o qual simula os efeitos de repetições de carga de um eixo padrão de 80 kN (COUTINHO, 2011).

Embora este método tenha sido elaborado sobre bases empíricas, foram realizados estudos teóricos envolvendo a Teoria da Elasticidade para a elaboração dos ábacos de dimensionamento. Desta forma, pode-se considerar que a parte das adaptações do método CBR são, na realidade, métodos semi-empíricos de dimensionamento (COUTINHO, 2011).

O método proposto por Murilo Lopes foi uma adaptação ao estudo desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) e ao conceito de equivalência estrutural estabelecido na Pista experimental da *American Association of State Highway Officials* (AASHO). Essa metodologia de dimensionamento é feita em função de dois

parâmetros: capacidade de suporte do subleito, medida pelo ensaio ISC – Índice de Suporte Califórnia, conhecido popularmente como CBR (*California Bearing Ratio*) e ao número equivalente N de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido (DNIT, 2006).

O ensaio ISC (Índice de Suporte Califórnia) expressa a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração em um cilindro de pedra britada padronizada. Através desse ensaio é possível extrair informações sobre as propriedades de deformabilidade, resistência mecânica e expansividade dos solos (COUTINHO, 2011).

Segundo Senço (2001), para a determinação do número de operações de um eixo padrão N, se faz necessário um produto de condicionantes, sendo elas o volume médio diário, o volume total em um ano e o volume total em um período de projeto. Além disso, fatores de eixo, de carga e de veículos são parâmetros que devem ser determinados previamente para se obter o número N.

Com isso, a espessura total do pavimento é obtida através de ábacos que relacionam valores de tráfego com dados dos materiais do subleito para cada tipo de pavimento. Feito isso, procede-se o dimensionamento das espessuras das demais camadas (base, sub-base e reforço), fixando uma espessura para o revestimento e levando em consideração os materiais disponíveis e seus coeficientes de equivalência estrutural. Para esse cálculo utilizam-se inequações, visto que se deve considerar espessuras mínimas de acordo com os materiais empregados nas camadas (DNIT, 2006).

2.11. Dimensionamento hidráulico

Todos os tipos de pavimentos precisam ser dimensionados para suportarem cargas as quais são solicitadas e transmiti-las ao solo em uma magnitude compatível com sua resistência. No caso dos pavimentos permeáveis, sua estrutura precisa ser feita de modo a resistir essas solicitações além de permitir a passagem de água, que então fica armazenada por um tempo nas camadas de base e sub-base, funcionando assim como filtro e reservatório. Portanto, além do dimensionamento mecânico, é necessário realizar um pré-dimensionamento hidráulico para averiguar o volume de água que as camadas podem armazenar sem comprometer sua funcionalidade (VIRGILIIS, 2009).

De acordo com Marchioni e Silva (2011), para realizar esse pré-dimensionamento deve-se conhecer os dados de precipitação da região, o coeficiente de permeabilidade do solo e a possibilidade de contaminação da água. A partir disso, define-se o tipo de infiltração do sistema,

que pode ser total, parcial ou sem infiltração. Este último caso é indicado quando o solo possui pouca permeabilidade ou há possibilidade de contaminação da água, dessa forma direciona-se toda água para um sistema de drenagem.

A norma NBR 16416:2015 apresenta uma referência para a escolha do tipo de infiltração, de acordo com as condições locais do terreno e com o coeficiente de permeabilidade, parâmetro importante de análise o qual expressa numericamente a velocidade com que a água infiltra no solo. A Tabela 1 correlaciona esses parâmetros com a escolha do tipo de infiltração.

Tabela 1 - Tipo de infiltração do pavimento em função das condições locais.

Condições locais		Infiltração Total	Infiltração Parcial	Sem Infiltração
Coeficiente de permeabilidade do subleito (mm/h)	> 3600	✓	✓	✓
	36 a 3600	x	✓	✓
	0,36 a 36	x	x	✓
Nível do lençol freático a menos de 1 metro da camada inferior da base		x	x	✓
Presença de contaminantes no subleito		x	x	✓

Fonte: NBR 16416 (2015).

O dimensionamento da estrutura compreende na determinação do volume drenado pela superfície. A precipitação é obtida considerando o tempo de retorno de projeto e a equação IDF (intensidade, duração e frequência) da região.

O período de retorno representa um número médio de anos em que, para a mesma duração de precipitação, uma intensidade pluviométrica é igualada ou ultrapassada. Sua escolha nos projetos está associada a característica do pavimento e ao grau de impacto ao longo da sua vida útil. De acordo com a norma NBR 16416:2015, deve-se adotar um período de retorno de no mínimo 10 anos e um tempo de duração de 1 hora.

Para um pavimento permeável com infiltração total por exemplo, o reservatório deve garantir a acomodação do volume de água da chuva de projeto menos o volume que infiltra durante a chuva. Assim, de acordo com Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), o volume retido pelo pavimento permeável pode ser estimado pela Equação 1:

$$V_r = (i_p + C - i_e) * t_d \quad (1)$$

em que:

V_r = volume de chuva a ser retido pelo reservatório (mm);

i_p = intensidade máxima da chuva de projeto (mm/h);

i_e = taxa de infiltração no solo (mm/h);

t_d = tempo de duração da chuva (h);

C = fator de contribuição de áreas externas ao pavimento permeável (mm/h), que pode ser calculado pela Equação 2:

$$C = \frac{i_p * A_c}{A_p} \quad (2)$$

em que:

A_c = área externa de contribuição para o pavimento permeável;

A_p = área de pavimento permeável.

A próxima etapa, de acordo com Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), consiste em calcular a porosidade das camadas de base e sub-base, propriedade a qual expressa, conforme a Equação 3, a relação entre volumes de vazios e o volume total.

$$n = \frac{V_L * V_G}{V_T} \quad (3)$$

em que:

n = porosidade do material;

V_L = volume de líquidos;

V_G = volume de vazios;

V_T = volume total da amostra.

Por fim, a profundidade do reservatório granular pode ser calculada pela Equação 4:

$$H = \frac{V_r}{n} \quad (4)$$

em que:

H = é a profundidade do reservatório (mm);

V_r = é a altura precipitada (mm).

Desta forma, adota-se como espessura final para as camadas do pavimento as dimensões que satisfazem as duas condições, ou seja, o maior valor encontrado entre os dois dimensionamentos, hidráulico e estrutural, segundo Marchini e Silva (2011). Por questões construtivas, recomenda-se que a camada de reservação tenha uma profundidade mínima de 15 cm, assim como é proposto no dimensionamento mecânico para as camadas de base e sub-base.

2.12. Execução do pavimento permeável

O processo construtivo dos pavimentos permeáveis se assemelha bastante ao dos impermeáveis, sendo que as principais diferenças se devem aos materiais utilizados nas camadas e aos cuidados durante a execução, visto que qualquer detalhe pode acarretar na perda da qualidade estrutural. Segundo Virgiliis (2009), o processo de construção dos pavimentos permeáveis pode ser dividido, via de regra, nas seguintes etapas:

2.12.1. Locação da obra

Inicialmente deve-se fazer a marcação dos pontos principais da estrutura, os quais serão tomados como referências no decorrer do processo construtivo, como: limites da obra, eixos transversais e longitudinais, profundidade dos cortes e aterros, localização do sistema de captação e saídas de água, dentre outros.

A próxima etapa consiste na limpeza do terreno e remoção da camada vegetal com auxílio de equipamentos e maquinários apropriados, como pode ser visto na Figura 15. É fundamental que toda área esteja devidamente preparada para receber as camadas do pavimento. Caso a construção se dê em uma região já pavimentada, é importante a remoção de todas as suas camadas, deixando-o assim em terreno natural (VIRGILIIS, 2009).

Figura 15 - Limpeza do terreno



Fonte: Virgiliis (2009).

2.12.2. Preparo do subleito

Com auxílio do projeto de terraplanagem, inicia-se a abertura da caixa e o preparo do subleito (Figura 16). Desta forma, o terreno é escavado até uma cota pré-determinada em projeto. É importante verificar a necessidade de se importar terra para executar a terraplanagem e se o subleito requer uma camada de reforço, de acordo com seu CBR. Caso for necessário, deve-se fazer um estudo sobre a disponibilidade de solos próximos a região, diminuindo os custos de transportes (VIRGILIIS, 2009).

Para finalizar essa etapa, deve-se executar a compactação do subleito, que pode ser feita manualmente ou com rolos compactadores, a depender dos custos e da área. É importante que os operários estejam atentos para a declividade determinada em projeto, devendo ser executada corretamente para se evitar futuros problemas (MARCHIONI; SILVA, 2011).

Figura 16 - Preparo do subleito



Fonte: Virgiliis (2009).

2.12.3. Manta impermeável

De acordo com Virgiliis (2009), quando o pavimento permeável for projetado exclusivamente para armazenamento e detenção, ou seja, a água presente nas camadas não irá infiltrar no subleito, deve-se colocar uma manta plástica impermeável, também denominada de geomembrana, como mostra a Figura 17.

De acordo com a NBR 16416:2015, que estabelece requisitos e procedimentos para os pavimentos permeáveis de concreto, a manta impermeável tem a função de reter toda água que percola pela estrutura do pavimento e assim proteger o subleito de uma saturação. Recomenda-se ainda uma conferência do subleito, para que não haja qualquer tipo de material cortante ou pontiagudo que possa danificar a geomembrana. Sua utilização é feita em regiões de solos argilosos com baixa permeabilidade.

Figura 17 – Assentamento da geomembrana



Fonte: Marchioni e Silva (2011).

2.12.4. Manta geotêxtil

Nos projetos em que os pavimentos permeáveis terão infiltração total ou parcial, recomenda-se o posicionamento de uma manta geotêxtil (Figura 18). Segundo a NBR 16416:2015 é uma manta não tecido com filamentos que permitem a passagem do fluxo de água e evitam a migração de partículas sólidas entre as camadas do pavimento. Quando ocorre essa mistura de materiais a capacidade drenante da base é prejudicada, pois o solo irá preencher os vazios dos materiais granulares impedindo a passagem de água (MARCHIONI; SILVA, 2011).

Figura 18 – Assentamento da manta geotêxtil



Fonte: Virgiliis (2009).

2.12.5. Tubos de dreno

Nos pavimentos dimensionados para que não haja infiltração no subleito ou que tenha uma infiltração parcial, faz-se necessário a instalação de tubos de dreno furados e envolvidos pela manta geotêxtil (Figura 19) os quais irão realizar a retirada da água armazenada nas camadas e direcioná-las posteriormente para uma rede de drenagem. O espaçamento entre eles, bem como o diâmetro utilizado serão dados em função da chuva de projeto da região. Usualmente, recomenda-se um espaçamento de 3 a 8 metros entre os tubos (VIRGILIIS, 2009).

Figura 19 - Tubos de dreno



Fonte: Virgiliis (2009).

2.12.6. Camadas permeáveis

Para os pavimentos que possuem a manta impermeável, ou seja, aqueles voltados para o armazenamento nas camadas, deve-se executar uma camada de areia fina e uma de pó-de-pedra, ambas com aproximadamente 5 cm. Esse procedimento é importante para que o material granular da sub-base não fique em contato com geomembrana, evitando danificá-la. Além do mais, as primeiras camadas devem ser espalhadas manualmente, pois a tração dos pneus das máquinas pode levar ao rompimento da manta (VIRGILIIS, 2009).

A partir disso, procede-se a execução pelo espalhamento do material granular da sub-base e da base, que deve ser feito de maneira cuidadosa para que não ocorra a penetração na membrana impermeável. Ambas camadas podem ser compactadas, como na Figura 20, usando placa vibratória ou rolo compactador (VIRGILIIS, 2009).

Figura 20 - Compactação das camadas.



Fonte: Virgiliis (2009).

2.12.7. Dispositivos de drenagem

Nos projetos em que o pavimento permeável atua como sistema de armazenamento, além dos tubos de drenos furados instalados na cota mais baixa, deve-se instalar, logo após a camada do reservatório, uma tubulação comum para direcionar a água até uma caixa e a partir

dela para o sistema de drenagem urbano. É fundamental nesse procedimento atentar-se para as cotas das caixas e das tubulações, pois se elas forem posicionadas abaixo do sistema de drenagem urbana pode ser que haja refluxo, impossibilitando que o pavimento permeável exerça sua função (VIRGILIIS, 2009).

Além disso, se faz necessário a instalação de bocas de lobo, guias e sarjetas, para que possa ser realizado a captação dos volumes excedentes do escoamento superficial. As etapas descritas anteriormente são aplicadas para todos os tipos de pavimentos permeáveis, independente do sistema adotado. A partir disso, os próximos passos serão feitos em conformidade com o tipo de revestimento que será utilizado, ou seja, de asfalto e concreto permeáveis, blocos de concreto vazados ou blocos intertravados (VIRGILIIS,2009).

2.12.8. Camada porosa de atrito

No caso dos pavimentos permeáveis, a camada de revestimento feita de material betuminoso é denominada CPA (camada porosa de atrito), sendo uma das partes mais importante do pavimento (Figura 21). Desta forma, deve-se tomar cuidados especiais com a produção, transporte e aplicação dessa camada. Os procedimentos para implantação do asfalto permeável devem ser feitos com uma mão de obra qualificada, visando garantir o máximo desempenho de permeabilidade de sua estrutura (MARCHIONI; SILVA, 2011).

É fundamental executar uma camada de ligação sobre a camada de base para garantir a aderência com a camada de revestimento. No entanto, não se deve aplicar uma pintura de ligação do tipo RR (ruptura rápida), pois pode haver uma impermeabilização da base devido ao baixo teor de viscosidade dos materiais na temperatura de aplicação, fazendo com que o pavimento deixe de ser permeável (VIRGILIIS, 2009).

Figura 21 - Revestimento asfáltico permeável.



Fonte: Prefeitura de São Paulo (2012).

2.12.9. Concreto permeável

O revestimento de concreto permeável é fabricado de maneira semelhante ao convencional com a diferença básica de que os finos são retirados da mistura, não havendo nenhuma porção de areia em sua composição. Desta forma, se tem um material conglomerado, o qual é formado por partículas de agregado graúdo recobertas por uma camada de cimento e água (VIRGILIIS, 2009).

Sua execução é feita através um espalhamento rápido e contínuo sobre a base, a qual deve ser previamente umedecida para se evitar a perda de água do concreto. Com isso, é feito o nivelamento manualmente ou com uma régua vibratória de alumínio. Neste último caso é importante estar atento para que o tempo de vibração não seja excessivo ao ponto de entupir os vazios. A consolidação do concreto é atingida através da compactação com auxílio de um rolo compactador, que deve ser feita o mais rápido possível (MARCHIONI; SILVA, 2011).

Assim, executam-se as juntas de dilatação logo após sua consolidação, sendo recomendado uma distância entre elas de 6 metros e uma profundidade de $\frac{1}{4}$ da espessura. Por fim, procede-se a cura e proteção do concreto fresco com uma manta plástica (MARCHIONI; SILVA, 2011).

2.12.10. Blocos intertravados

Inicia-se o processo de colocação dos blocos intertravados com o espalhamento da camada de assentamento, na qual deve possuir uma granulometria uniforme e sem a presença de partículas finas, para que a água possa infiltrar com maior facilidade. A partir disso, os blocos são posicionados adequadamente ao longo de toda área e o material para o rejuntamento dos blocos é espalhado sobre a superfície. Após a colocação de todo material, deve-se fazer uma varredura até que as juntas sejam totalmente preenchidas. Feito isso, retira-se o excesso e realiza a compactação dos blocos com uma placa vibratória provida de uma proteção de borracha, não danificando desta forma as peças do revestimento (VIRGILIIS, 2009).

2.12.11. Blocos de concreto vazados

O processo executivo dos blocos de concreto vazado é similar ao dos blocos intertravados. É feito o espalhamento da camada de assentamento com material de granulometria uniforme e os blocos são posicionados lado a lado resultando em uma superfície semelhante a uma grelha ou desenho simétrico padrão. Depois desse procedimento é feito o preenchimento nas aberturas dos blocos utilizando agregados ou grama (VIRGILIIS, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como forma de atingir os objetivos do trabalho, adotou-se como metodologia de estudo uma revisão de literatura, fundamentada sobretudo em artigos científicos, trabalhos, teses e dissertações acerca do tema proposto. A natureza de pesquisa utilizada foi do tipo descritiva, de tal forma que buscou-se analisar, interpretar, detalhar e caracterizar as informações encontradas sobre os pavimentos permeáveis e convencionais.

Os tópicos desse trabalho foram tratados de maneira qualitativa, visando relacionar as ideias e estabelecer diretrizes sobre a utilização e execução desses pavimentos. Além disso, as principais características e propriedades dos pavimentos permeáveis, assim como suas vantagens e limitações, foram analisadas e discutidas.

Outros parâmetros tiveram suas análises feitas de forma quantitativa, baseadas em resultados alcançados por demais autores, como a taxa de infiltração da água no solo, os índices de vazios dos materiais, o período de manutenção, a resistência mecânica dos revestimentos e os custos de implantação dos pavimentos permeáveis e convencionais. De modo a correlacionar todas essas informações, tabelas, gráficos e fluxogramas foram utilizados como ferramentas de apresentação, os quais contribuíram para uma análise mais clara e rápida dos resultados.

A análise de viabilidade técnica foi pautada nas características do tráfego, na permeabilidade do subleito, nos riscos de contaminação dos aquíferos e no nível do lençol freático. A análise dos custos de execução dos pavimentos foi baseada em trabalhos de outros autores, levando em consideração apenas os preços dos materiais e a parcela da mão de obra.

As taxas referentes ao projeto executivo, processo de terraplanagem, maquinários utilizados na execução dos serviços e valores referentes a reparos e manutenções não foram analisados nesse trabalho. Os pavimentos convencionais tomados como parâmetros de comparação foram os revestidos com asfalto usinado a quente e com blocos comuns, por serem amplamente utilizados em todo Brasil.

Todas as informações e resultados apresentados foram obtidos através de dados secundários, os quais foram analisados com base em conceitos, trabalhos e experimentos registrados por outros pesquisadores e autores. Dessa forma, as ideias semelhantes, opostas ou complementares foram comentadas e sintetizadas ao longo do capítulo de resultados e discussões.

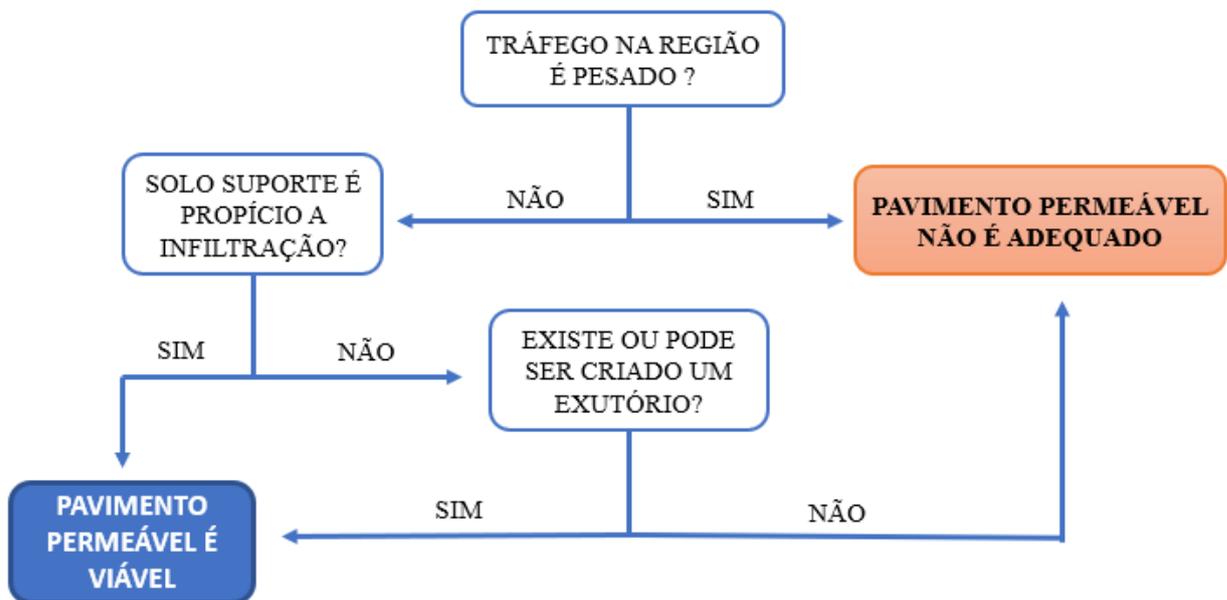
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Baseado no levantamento da literatura atual, os resultados e discussões serão apresentados na sequência através de fluxogramas, tabelas e figuras, abordando aspectos como aplicação, materiais, propriedades e execução.

4.1. Aplicações e viabilidade

Empregando dados obtidos por diferentes autores, como Virgiliis (2009), Acioli (2005) e Holtz (2011), foi elaborado um fluxograma de análise inicial conforme esquematizado na Figura 22. Neste fluxograma têm-se organizado os principais parâmetros que precisam ser analisados inicialmente para averiguar a possibilidade ou não da utilização dos pavimentos permeáveis em uma determinada região. É possível obter uma primeira aproximação acerca do emprego de um pavimento permeável através de caminhos simples baseados em dados levantados do futuro projeto.

Figura 22 - Fluxograma para análise inicial da viabilidade técnica.



Fonte: Autor (2020).

O primeiro parâmetro trata-se do volume de tráfego previsto para o futuro projeto de pavimentação. Segundo Virgiliis (2009), diferentemente dos pavimentos convencionais, nos pavimentos permeáveis as elevadas magnitudes de carga podem inviabilizar o projeto uma vez que em estruturas permeáveis têm-se um elevado índices de vazios, perdendo consideravelmente sua capacidade de suporte. No entanto, quando o projeto prevê pouca

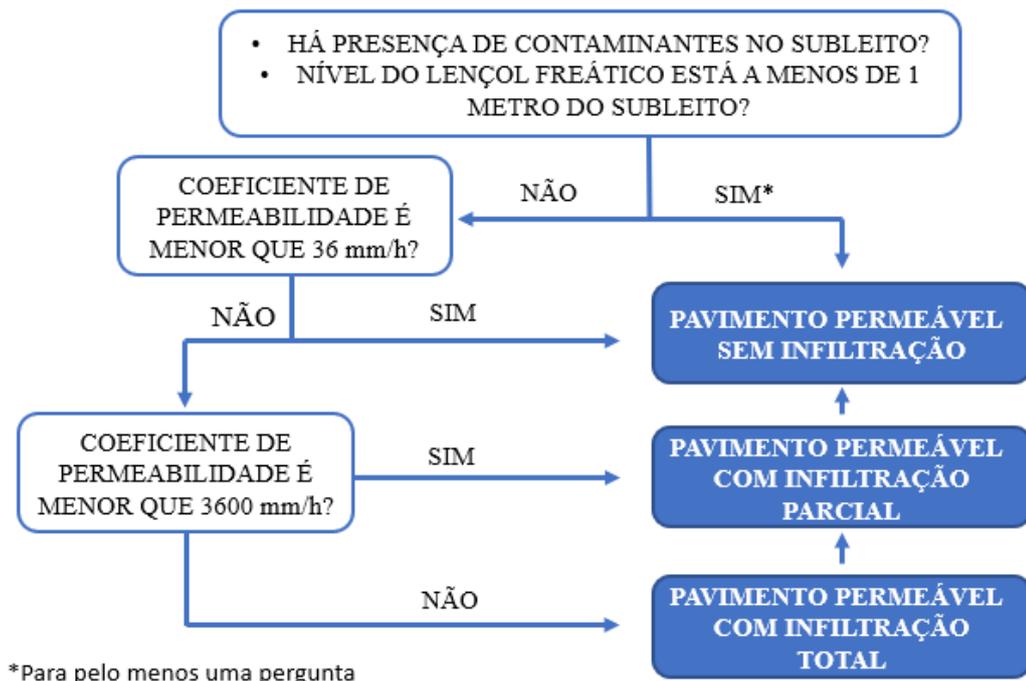
solicitação de carga, têm-se um bom indício de que o pavimento permeável possa ser utilizado nessa região.

A próxima etapa, conforme o fluxograma apresentado, consiste em analisar a capacidade de infiltração do solo suporte da região, que pode ser feita em campo ou em laboratório, através de ensaios de permeabilidade preconizados em norma. Quando os valores encontrados forem satisfatórios para infiltração (Tabela 1), sua aplicação é viável para esse fim. Do contrário, é necessário averiguar a possibilidade de criação de um exutório para que a água infiltrada possa ser escoada após o período de armazenamento.

Dessa forma, quando não se atende pelo menos uma das condições propostas, ou seja, boa capacidade de infiltração e existência ou criação de um exutório, os pavimentos permeáveis não serão adequados para essa região, visto que segundo Holtz (2011), o volume armazenado voltaria para a superfície por não haver outro caminho de saída.

Uma vez definida a viabilidade inicial, ainda se faz necessário uma análise para definição do tipo de sistema mais adequado. Nesse sentido, foi elaborado um outro fluxograma baseado na literatura apresentada por Virgiliis (2009), Acioli (2005) e Holtz (2011), conforme a Figura 23, que sintetiza as informações e complementa o primeiro fluxograma apresentado. O nível do lençol freático e a presença de contaminantes são alguns parâmetros relevantes que devemos considerar nessa análise, segundo os autores.

Figura 23 - Fluxograma para definição do tipo de infiltração.



A primeira variável de análise se refere a possível presença de contaminantes no subleito. Quando o aquífero da região for muito susceptível à poluição, a possibilidade de infiltração é descartada, pois as águas pluviais carregam esgoto e poluentes de origem difusa, desta forma permitir a infiltração pode ocasionar grandes problemas ao meio ambiente.

Devemos avaliar ainda o nível do lençol freático na região. Caso o mesmo se encontre em uma altura próximo do fundo do dispositivo, a menos de 1 metro, como preconizado na norma NBR 16416:2015, Virgiliis (2009) e Holtz (2011) não recomendam sua implantação para fins de infiltração. Desse modo, podemos observar que uma região pode apresentar um solo propício a infiltração e ter seu uso apenas para fins de armazenamento, caso o lençol freático seja elevado ou exista riscos de contaminação do aquífero.

Nas condições em que a infiltração total é praticável, os outros dois tipos de sistemas, com infiltração parcial ou sem infiltração, também podem ser empregados sem nenhum problema, ficando a critério do projetista ou do responsável. No entanto, o contrário não é válido, se a pavimentação for aconselhável sem infiltração, não se deve permitir qualquer tipo de percolação para o solo suporte.

É importante ressaltar que os fluxogramas apresentados anteriormente servem apenas como guias rápidos para análise de viabilidade e tomada de decisões iniciais, não sendo totalmente determinantes nas escolhas, visto que trabalhos sobre a implantação desse pavimentos em regiões de carga pesada estão sendo desenvolvidos, como o de Yang e Jiang (2003), que será discutido mais à frente.

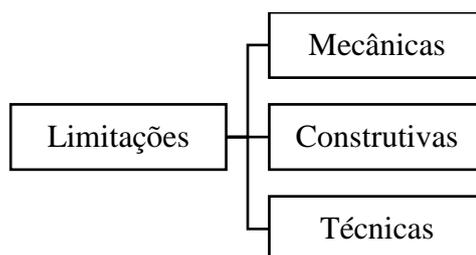
Algumas considerações complementares ainda precisam ser consideradas nesta análise preliminar da viabilidade. Ciria (1996) aconselha uma verificação das estruturas de engenharia próximas, detectando a presença de fundações que podem ser prejudicadas pelo aumento da umidade local.

Na presença de instalações subterrâneas, como rede de água, esgoto, luz e telefone, os pavimentos só poderão ser instalados se as mesmas forem realocadas ou se a configuração inicial do projeto permitir uma modificação. No entanto, tal consideração não é exclusiva para os pavimentos permeáveis, haja vista que qualquer escavação para uma obra de engenharia precisa de uma análise inicial desses fatores.

4.2. Limitações

Os pavimentos permeáveis por exercerem dupla função, mecânica e hidráulica, possuem seu campo de aplicação bastante restrito, apresentando diversas limitações específicas. Essas limitações podem ser, conforme a Figura 24, de caráter mecânico, de método construtivo e ainda por uma falta de base bem consolidada do conhecimento técnico. Dessa forma, serão discutidas e apresentadas algumas limitações específicas acerca dos pavimentos permeáveis.

Figura 24 - Limitações dos pavimentos permeáveis



Fonte: Autor (2020).

Do ponto de vista mecânico, autores como Virgiliis (2009), Gonçalves e Oliveira (2014) e Holtz (2011), apontam que esse tipo de revestimento deve ser empregado em situações de tráfego leve, como estacionamento, ruas residências, ciclovias, parques entre outros. Apesar disso, como mencionado anteriormente, autores como Yang e Jiang (2003) apontam que esse mesmo pavimento possa vim atender de forma adequada tráfegos mais elevados. Porém, como há uma carência de pesquisas nesse âmbito, sua aplicação nos dias atuais ainda se encontra restrita para regiões com cargas baixas.

Já do ponto de vista de especificidades no processo construtivo, a superfície do revestimento permeável deve ser a mais plana possível, possibilitando que o pavimento tenha uma infiltração considerável de água da chuva. Tal fato acaba limitando sua aplicação em regiões de aclive e declive, uma vez que autores como Schueler (1987) e Virgiliis (2009) recomendam a adoção de uma declividade longitudinal máxima de 5% para este tipo de dispositivo, visto que quanto maior a declividade da pista, menor a taxa de taxa de infiltração, o que por sua vez não favoreceria seu funcionamento.

Finalmente, outro aspecto que limita sua aplicação em alta escala é carência de mão de obra especializada que sua execução exige. Apesar de terem seu processo construtivo bastante semelhante ao dos pavimentos convencionais, Virgiliis (2009) destaca que uma mão de obra qualificada é fundamental para que obter um máximo desempenho de permeabilidade, posto que cada etapa necessita de muita atenção e cuidado.

Podemos constatar que a falta de controle na construção pode levar a erros de compactação das camadas, obstrução dos poros, perfuração dos filtros geotêxteis ou da membrana impermeável, bem como a contaminação do lençol freático.

No Brasil, a implementação dos pavimentos permeáveis está contida em grande parte dos planos diretores das cidades, como proposta de controle do escoamento superficial na fonte, segundo Tucci (1998). No entanto, sua utilização ainda é muito pequena nos centros urbanos, não somente pelas limitações mencionadas, mas principalmente pela falta de conhecimento dos profissionais e contratantes sobre seus benefícios e vantagens.

4.3. Principais propriedades

4.3.1. Índices de vazios

Para os pavimentos permeáveis exercerem sua função hidráulica, suas camadas precisam apresentar um elevado índice de vazios interligados que permitem uma grande percolação das águas pluviais. Para isso, os materiais presentes em sua estrutura apresentam uma granulometria bastante uniforme ou aberta, com presença quase nula de agregados miúdos.

Acioli (2005) ressalta que a porosidade efetiva do asfalto permeável deve variar preferencialmente entre 18% e 22%, sendo a porcentagem total de vazios de aproximadamente 20%. Já para Virgiliis (2009), a escolha dos materiais deve ser feita de modo que a porosidade final da mistura seja de pelo menos 20%.

Desta forma, podemos notar que a porosidade final de uma estrutura permeável varia de acordo com a resistência mecânica pretendida e com a finalidade de utilização do pavimento. Como parâmetro de comparação, os pavimentos convencionais possuem aproximadamente 4% de vazios em sua estrutura, de acordo com Virgiliis (2009) e Acioli (2005). Tal fato demonstra a grande diferença dos pavimentos permeáveis em relação aos pavimentos convencionais.

4.3.2. Permeabilidade

Nos últimos anos diversos trabalhos experimentais têm sido desenvolvidos com o intuito de avaliar a eficiência dos diferentes tipos de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial. Um estudo que serviu como referência para os demais foi elaborado por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), que utilizaram um simulador de chuva para comparar valores de escoamento superficial gerado por diferentes superfícies utilizadas na pavimentação, sendo elas: solo compactado, revestimento de paralelepípedo com juntas de areia, pavimento

com blocos de concreto, concreto convencional impermeável, blocos vazados preenchidos com areia e concreto permeável. Os valores encontrados seguem apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de escoamento para cada superfície.

Revestimento	Chuva Total (mm)	Escoamento Total (mm)	Coeficiente de escoamento
Concreto convencional	18,33	17,45	0,95
Blocos de concreto	19,33	15,00	0,78
Solo compactado	18,66	12,32	0,66
Paralelepípedos	18,33	10,99	0,60
Blocos vazados de areia	18,33	0,50	0,03
Concreto permeável	20	0,01	0,005

Fonte: Adaptado de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000).

Os resultados apresentados apontam uma grande contribuição dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. Dentre todas superfícies estudadas, as de concreto permeável e blocos vazados apresentaram valores de coeficientes de escoamento muito satisfatórios, não ultrapassando 5%, indicando que praticamente todo volume precipitado é infiltrado nesses revestimentos.

Por sua vez, os blocos de concreto e os paralelepípedos apresentarem coeficientes de escoamento maiores em relação ao concreto permeável e aos blocos vazados. Essa diferença se deve a menor área destinada a infiltração desses revestimentos, os quais permitem a entrada de água apenas por meio de suas juntas de areia. Tal característica, segundo Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), faz com que eles sejam classificados muitas vezes como pavimentos semipermeáveis.

Ainda tratando das questões de permeabilidade, temos o trabalho de Acioli (2005), que realizou um estudo prático em um estacionamento, Figura 25, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O estudo tinha como objetivo analisar a viabilidade técnica da utilização de um pavimento permeável no controle do escoamento superficial. Para isso, foram construídos dois sistemas permeáveis, um com revestimento de asfalto permeável e o outro com blocos vazados de concreto preenchidos com grama.

Figura 25 - Pavimento permeável com asfalto poroso e blocos vazados.



Fonte: Adaptado de Acioli (2005).

Os valores obtidos seguem apresentados na Tabela 3. Como resultado, os coeficientes de escoamento do asfalto permeável variaram de 0 a 0,135 durante esse período, tendo uma média de 0,051. Para os blocos de concreto vazados teve-se como valor médio 0,023, sendo que para a maioria dos eventos não houve registros de escoamento superficial.

Tabela 3 - Coeficientes de escoamento médio para as duas superfícies de estudo.

Revestimento	Precipitação média (mm)	Escoamento médio (mm)	Coefficiente de escoamento médio
Blocos vazados c/ grama	27,55	0,74	0,027
Asfalto permeável	27,55	1,40	0,051

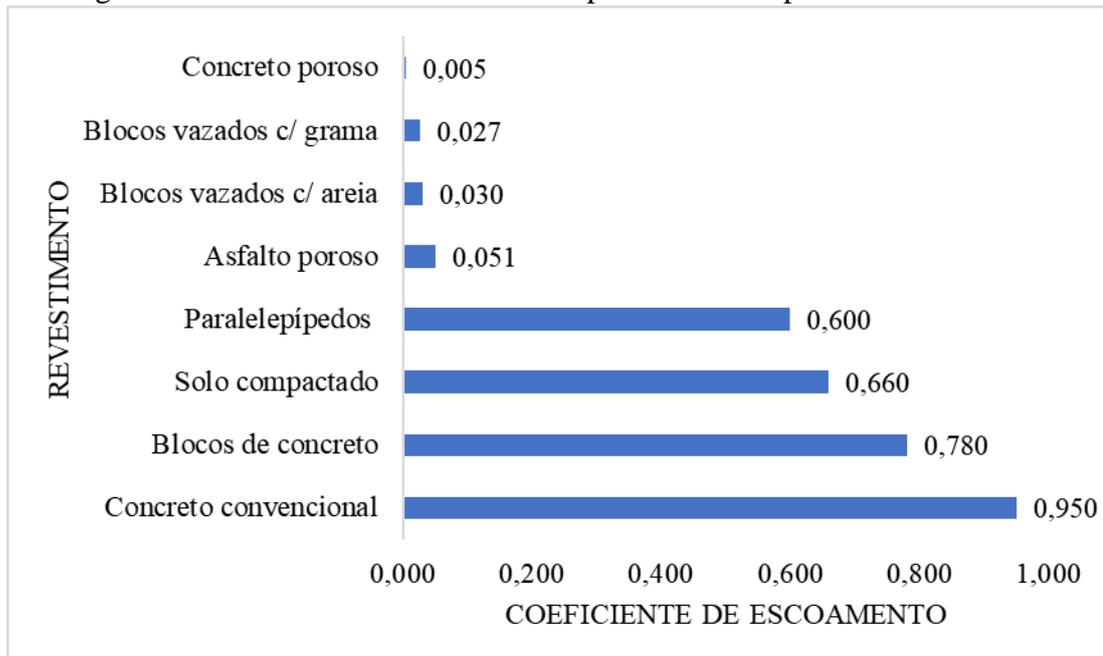
Fonte: Autor (2020).

Os dois revestimentos apresentaram um coeficiente médio muito baixo ao se comparar com os valores obtidos por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) para o revestimento de concreto convencional e para os blocos de concreto, mostrando a grande capacidade dessas superficiais de reduzir o escoamento superficial.

Essa pequena diferença de desempenhos entre os dois revestimentos, asfalto permeável e blocos vazados com grama, pode ser atribuída ao fato de que os blocos possuem maiores aberturas, devido a sua parte vazada, a qual funciona como um pequeno reservatório. Desta forma, mesmo onde a capacidade de infiltração do material de enchimento se excede, há um “volume de espera” que de acordo com Acioli (2005) armazena parte da precipitação, diminuindo assim o escoamento superficial.

Conciliando os dados obtidos pelos autores nos dois trabalhos, é possível realizar uma análise completa entre os coeficientes de escoamento de todos os tipos de revestimentos permeáveis, confrontando ainda com uma superfície natural (solo compactado) e uma impermeável (concreto convencional). Os dados agrupados se encontram na Figura 26.

Figura 26 - Coeficientes de escoamento para diversos tipos de revestimento.



Fonte: Autor (2020).

Todos os tipos de pavimentos permeáveis (concreto, asfalto, blocos vazados e intertravados) apresentaram significativa redução do escoamento superficial. Os blocos de concreto e os paralelepípedos foram os que apresentaram menor eficiência dentre os revestimentos permeáveis, o que era de se esperar, pois a área superficial destinada a infiltração nesses revestimentos é pequena, estando concentrada apenas nas juntas. Apesar disso, podemos verificar que sua utilização contribui, mesmo em menor proporção, para uma redução do escoamento ao se comparar com as superfícies impermeáveis e até mesmo com o solo compactado.

A diferença dos coeficientes de escoamento entre os revestimentos permeáveis de asfalto e concreto não significa necessariamente que o concreto apresenta melhor capacidade de infiltração, haja vista que o experimento realizado por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) considerou apenas um evento de precipitação. No entanto, esses valores certamente se aproximam se analisados nas mesmas condições.

4.3.3. Resistência mecânica

São apresentadas na Tabela 4 algumas considerações acerca das propriedades mecânicas de resistência a tração e a compressão dos pavimentos permeáveis e convencionais. A norma NBR 16416:2015 preconiza valores mínimos de resistência para os concretos permeáveis constituídos de cimento Portland para tráfego leve, bem como para os concretos convencionais utilizados na pavimentação.

A Tabela 4 apresenta ainda valores de resistência mecânica obtidos por Botteon (2017) em seu trabalho sobre caracterização de concretos permeáveis. Tal pesquisa teve como objetivo analisar a variação dos valores de resistência mecânica e permeabilidade das misturas na presença de agregados miúdos.

Tabela 4 - Características dos concretos permeáveis e convencionais de cimento Portland.

	Tipo	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Observações
NBR 16416	Convencional	20 a 60	4,5 a 5,0	Bem graduado com 30 a 50% do agregado total em areia.
	Permeável	3 a 30	> 2	Graduação aberta contendo pouca ou nenhuma porção de areia.
Botteon (2017)	Permeável	11,90	2,04	Traço 1:4 sem a presença de areia.
	Permeável	20,80	2,20	Traço 1:4 com substituição de 7% do agregado graúdo por areia grossa.

Fonte: Autor (2020).

Pelos resultados descritos é possível observar que a resistência à compressão das misturas feitas por Botteon (2007) se enquadram dentro dos limites normativos. A segunda mistura alcançou 20,8 MPa de resistência à compressão, o que representa um valor maior em aproximadamente 75% em relação a primeira, que foi de 11,90 MPa. Podemos atribuir essa grande diferença a presença de agregados miúdos na composição, os quais contribuem para um aumento de resistência por proporcionarem maior contato entre os componentes.

De acordo Botteon (2017), os índices de vazios da primeira mistura variaram entre 0,20 e 0,25, o que se enquadra numa classificação de alta porosidade. Já para a segunda mistura, os índices de vazios apresentaram uma redução pela presença de areia, ficando entre 0,15 e 0,18.

Apesar disso, a taxa de infiltração dessa mistura foi superior ao mínimo recomendado segundo Botteon (2017), ou seja, uma pequena adição de agregado miúdo aumentou consideravelmente os valores de resistência a compressão e não comprometeu a permeabilidade da estrutura.

Quanto à tração, é possível observar que o concreto permeável apresenta valores de resistência muito próximos dos limites mínimos exigidos para aplicação como pavimento, de acordo com a NBR 16416:2015. Além disso, houve um pequeno aumento da resistência à tração da segunda mistura pela presença de agregados miúdos. Como consequência, a permeabilidade dessas misturas apresentou reduções, mas que também não foram significativas ao ponto de influenciar na capacidade de infiltração, de acordo com Botteon (2017).

Vale destacar que os valores obtidos para os concretos permeáveis foram satisfatórios, já que não foram utilizados aditivos para aumento da resistência mecânica das misturas, apenas para atingir uma maior trabalhabilidade. Quando se faz uso de aditivos especiais, os índices de resistência mecânica aumentam significativamente, segundo Monteiro (2011).

Yang e Jiang (2003) por exemplo, alcançaram valores de resistência à compressão e à tração de 50 MPa e 6 MPa, respectivamente, através da adição de minerais selecionados e intensificadores orgânicos. Tal fato mostra a importância de se estudar métodos que melhorem suas propriedades mecânicas para o aumento do seu campo de aplicação.

4.4. Dimensionamento e execução

O dimensionamento dos pavimentos permeáveis se assemelha bastante ao dos pavimentos convencionais, como destaca Virgiliis (2009). A grande diferença se deve a etapa de pré dimensionamento hidráulico, que é de extrema importância para um bom funcionamento dos pavimentos permeáveis. No mais, todo o processo de dimensionamento mecânico é feito de maneira similar nos dois pavimentos.

Em relação a execução, na Tabela 5 estão descritos os principais serviços e materiais utilizados para cada tipo de pavimentação. Existem algumas diferenças entre os materiais empregados e os serviços executados nos pavimentos permeáveis e nos pavimentos convencionais. Os serviços essenciais de terraplanagem e compactação das camadas são similares nos dois empreendimentos, sendo etapas básicas em qualquer obra de pavimentação.

Quanto aos materiais, a única semelhança entre os pavimentos se deve a utilização dos agregados graúdos. Para os pavimentos permeáveis, Virgiliis (2009) aponta a necessidade de três materiais que auxiliam no seu funcionamento: manta geotêxtil, geomembrana e tubos de dreno. Tal consideração não se enquadra para os pavimentos convencionais, visto que não são projetados para função de armazenamento de águas pluviais.

Tabela 5 - Materiais utilizados e serviços executado de cada pavimento.

		PAVIMENTO	
		PERMEÁVEL	CONVENCIONAL
MATERIAIS	Manta Geotêxtil	✓	x
	Geomembrana	✓	x
	Tubos de dreno	✓	x
	Agregados graúdos	✓	✓
	Agregados miúdos	x	✓
	Revestimento permeável	✓	x
SERVIÇOS	Terraplanagem	✓	✓
	Compactação	✓	✓
	Imprimação impermeabilizante	x	✓
	Imprimação ligante	✓	✓
	Teste de permeabilidade	✓	x

Fonte: Autor (2020).

Nos pavimentos em que o sistema de infiltração é adequado, devemos dispor uma manta geotêxtil entre as interfaces das camadas, a qual funciona como um filtro, impedindo a penetração do material granular no solo e dos finos nas camadas permeáveis. Para Virgiliis (2009) essa etapa da construção é fundamental para o bom funcionamento da estrutura, pois a manta de filamentos permite a infiltração da água e inibe o carreamento das partículas, o que mantém a integridade e funcionalidade de toda estrutura.

No caso dos pavimentos permeáveis voltados ao armazenamento temporário, devemos dispor de uma manta impermeável (geomembrana) sobre o sub leito com propósito de impedir a infiltração no solo suporte. Aliado a isso, Virgiliis (2009) enfatiza sobre a necessidade de instalação de uma tubulação de drenagem perfurada no fundo da base para o transporte do volume drenado para uma rede coletora.

Vale lembrar que a utilização de agregados miúdos nas camadas dos pavimentos permeáveis pode até ser feita, desde que em proporções que não comprometam a permeabilidade da estrutura. Além do mais, Botteon (2017) destaca que nos revestimentos de blocos vazados e intertravados, utiliza-se areia como material de assentamento, mas não nas camadas de armazenamento de água.

Outra peculiaridade dos pavimentos permeáveis é quanto ao serviço de imprimação realizado antes da execução do revestimento asfáltico. Tal procedimento visa aumentar a coesão, impermeabilizar a estrutura e aumentar a aderência entre as camadas. No entanto, como os pavimentos permeáveis precisam permitir a percolação das águas pluviais, Virgiliis (2009)

não recomenda a execução de uma imprimação impermeabilizante do tipo RR (ruptura rápida), apenas uma imprimadura ligante executada com ligante asfáltico diluído de petróleo, promovendo uma aderência entre as camadas sem impermeabilizá-la.

4.5. Benefícios

De acordo com os resultados e discussões apresentados, é possível assimilar as diversas vantagens e ganhos da utilização dos pavimentos permeáveis em regiões com baixas solicitações de carga. Para melhor visualização, o fluxograma da Figura 27 foi construído destacando seus principais benefícios, que serão discutidos de acordo com levantamento bibliográfico.

Figura 27 - Principais benefícios da utilização dos pavimentos permeáveis.



Fonte: Autor (2020).

Esse tipo de estrutura por ser altamente permeável consegue absorver grande parte das águas pluviais, fazendo com que esse volume infiltre ou fique retido por mais tempo. Gonçalves e Oliveira (2014) apontam que a utilização dos pavimentos permeáveis diminui o fluxo nos cursos hídricos e conseqüentemente atenua a ocorrência de enchentes e alagamentos

Diversos autores têm analisado a contribuição dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, seja em comparação com outros sistemas de controle ou com relação

a áreas/pavimentos impermeáveis. Watanabe (2005) identificou uma redução de 20 % na vazão de pico após a instalação de pavimentos permeáveis em duas áreas de controle. Em uma pesquisa mais extensa, Rushton (2002), empregando pavimentos permeáveis em um estacionamento na Carolina do Norte (EUA), observou que todo escoamento gerado foi retido pela estrutura, sendo averiguado diversos eventos de precipitação para que os resultados fossem mais próximos da realidade.

Na cidade de Praia Grande, litoral do estado de São Paulo, a prefeitura local iniciou um projeto piloto de pavimentação asfáltica permeável no ano de 2018, visando amenizar os problemas de alagamento provenientes de chuvas rápidas com grande precipitação. O asfalto permeável foi implementado por cerca de 400 metros em uma rua com tráfego leve de veículos (Prefeitura de Praia Grande, 2018).

Como resultado, a região ainda não apresentou problemas de alagamentos e inundações, que eram recorrentes para os motoristas e moradores nos períodos chuvosos, comprovando assim a eficiência desse sistema. Além disso, a prefeitura pretende realizar um mapeamento na cidade para futuras aplicações devido ao sucesso dos novos pavimentos.

Os benefícios dos pavimentos permeáveis não estão limitados apenas a redução do escoamento. Sua aplicação pode controlar os efeitos da erosão do solo, reduzir o calor liberado pelas superfícies próximas e diminuir os impactos da urbanização, de acordo com Cooper (2013), Pinto (2011) e Silva e Poleto (2017).

Ademais, os pavimentos permeáveis se destacam frente a outras tecnologias de drenagem por não exigirem espaço próprio, sendo parte integrante da obra, o que não acontece com as valas de infiltração e bacias de retenção, por exemplo. Aliado a isso, segundo Silva e Poleto (2017), há uma grande economia com os custos relacionados as redes de drenagem, que não precisam ser reconstruídas de imediato para atender as crescentes demandas.

Outras vantagens quanto ao aspecto hidrológico não tão claras a princípio, mas que são extremamente relevantes, se referem a possibilidade de reabastecimento do lençol freático e dos aquíferos, quando os pavimentos são voltados para infiltração no solo suporte.

Legret e Colandini (1999), realizaram um experimento durante 8 anos sobre o potencial impacto da infiltração das águas superficiais nos recursos hídricos subterrâneos. A partir disso, constataram que a maioria dos poluentes são retidos na parte superior da camada porosa do revestimento, enquanto alguns metais como zinco e chumbo são filtrados ao longo de sua profundidade. Sendo assim, podemos inferir que os pavimentos apresentam baixa probabilidade de contaminação em regiões de lençóis freáticos mais profundos.

Além dos ganhos hidrológicos, os pavimentos permeáveis apresentam algumas características importantes que trazem benefícios para o usuário do sistema rodoviário. Castro (2005), destaca que sua utilização elimina toda água superficial que poderia empoçar a via em situações de elevadas precipitações. Assim sendo, temos que os fenômenos de aquaplanagem são extintos e os efeitos de “spray”, ocasionados pela passagem dos veículos, são reduzidos consideravelmente, garantindo maior conforto e segurança aos usuários em períodos chuvosos.

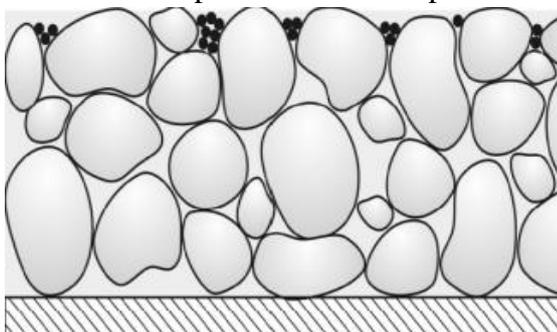
Virgiliis (2009) e Castro (2005) constataram ainda que quando os pavimentos permeáveis são utilizados nas vias, há uma pequena redução da reflexão de luzes em períodos noturnos, já que a película superficial de água é eliminada. Associado a isso, Bernucci et. al. (2008), destacam que os pavimentos revestidos por asfalto permeável apresentam uma redução de ruídos significativa, proporcionando melhor conforto para os motoristas e pedestres.

4.6. Manutenção e durabilidade

Para garantir um bom funcionamento e desempenho, os pavimentos permeáveis necessitam de operações e manutenções adequadas, devendo permanecer sempre limpos e livres de resíduos acumulados para não terem sua funcionalidade prejudicada.

Autores como Cooper (2013), Silva e Poletto (2017) e Pinto (2011), ressaltam que um dos problemas recorrentes nos pavimentos permeáveis é a tendência de colmatagem da estrutura, causada pela deposição de partículas nos poros da superfície, conforme a Figura 28. De fato, o preenchimento dos poros reduz drasticamente a durabilidade dos pavimentos, comprometendo sua capacidade de infiltração e reservação.

Figura 28 - Pavimento permeável com superfície colmatada.



Fonte: Castro (2005).

A efetividade da implantação dos pavimentos permeáveis está diretamente ligada à sua manutenção preventiva ou corretiva, que segundo Schueler (1987) podem ser feitas das seguintes formas:

- a) **Limpeza a vácuo:** realizada através de jatos de ar e seguidos por jatos de água de alta pressão, mantendo seus poros livres.
- b) **Inspeções:** o pavimento necessita de inspeções rotineiras nos primeiros meses após implantação para que sua eficiência seja analisada. Posteriormente, devem ser feitas observações periódicas e após eventos de precipitações elevadas, verificando assim os possíveis pontos de formação de poças.
- c) **Reparações:** em situações de deteriorações, como formação de buracos e rachaduras, sua superfície pode ser consertada com pavimentos convencionais (não permeáveis), desde que a área acumulada de reparo não ultrapasse 10% da área total.
- d) **Alívio de entupimento:** os poros entupidos podem ser aliviados através de pequenos furos na superfície ou pela instalação de tubos de passagem que direcionam o escoamento para a camada de reservação.

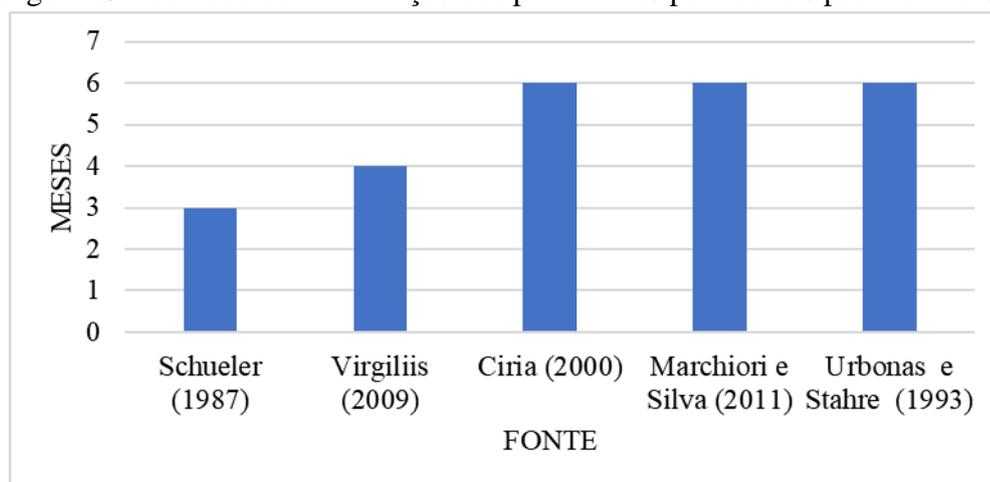
A limpeza a vácuo e as inspeções são os métodos mais utilizados e eficientes para preservação dos pavimentos, enquanto a realização de reparos e instalações de tubos de passagem não são os mais aconselháveis e práticos de serem feitos. Há ainda muitas situações em que são feitas limpezas através de varreduras manuais, que apesar de serem fáceis e rápidas podem agravar os problemas, visto que existe a possibilidade de resíduos adentrarem nas camadas durante esse procedimento, contribuindo para o processo de colmatação.

Schueler (1987), Marchioni e Silva (2011), Virgiliis (2009) e demais autores são unânimes quando citam a grande necessidade de manutenção desses pavimentos, entretanto a periodicidade na qual ela deve ser feita varia entre eles, conforme a Figura 29. É possível observar que apesar das pequenas divergências quanto à frequência de manutenção, todos autores apontam a necessidade de inspeções regulares pelo menos duas vezes ao ano.

É importante destacar que a degradação dos pavimentos depende das características locais, como o volume de tráfego e a existência de fontes de sedimentos próximas, como jardins e área propensas ao carreamento de sólidos. Nesse sentido, a diferença do período de manutenção apontado por Schueler em relação aos demais autores é atribuída as condições locais de observação.

Sendo assim, temos que cada situação requer uma frequência de manutenção diferente, mas em todas elas a inexistência pode levar a uma diminuição significativa da vida útil do pavimento permeável.

Figura 29 - Período de manutenção dos pavimentos permeáveis por cada autor.



Fonte: Autor (2020).

Segundo Virgiliis (2009), durante o primeiro ano de utilização há pouca perda da capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis, no entanto, após esse período, o revestimento tem sua capacidade drenante reduzida progressivamente, chegando a 50% do seu valor inicial. Tal informação coincide, segundo Schueler (1987), com um estudo conduzido em Maryland nos Estados Unidos, onde 75% dos sistemas com pavimentos permeáveis não indicaram problemas quanto a infiltração no primeiro ano, mas tiveram seus poros totalmente entupidos em até 5 anos, decorrentes da falta de cuidados e manutenções.

Dierkes et al. (2004), realizaram um experimento na Alemanha sobre a necessidade manutenção de um pavimento permeável com blocos intertravados de concreto, através de uma lavagem de alta pressão. Para isso, avaliou-se a eficiência na limpeza de um pavimento permeável com 1500 m² construído em uma escola alemã no ano de 1996. A capacidade de infiltração foi medida antes e depois da lavagem com auxílio de um equipamento apropriado.

Antes da lavagem, a capacidade de infiltração estava abaixo de 10 mm/h, comprovando que o pavimento estava completamente entupido. Após a lavagem, verificou-se um valor de aproximadamente 360 mm/h, sendo bastante satisfatório, visto que os valores exigidos na Alemanha para esses pavimentos são próximos de 98 mm/h. Assim, pôde-se apurar que os pavimentos permeáveis sofrem bastante com o entupimento ao decorrer dos anos, e por isso necessitam de cuidados. Entretanto, tal estudo comprovou que após a limpeza sua capacidade de infiltração volta a valores próximos da condição inicial de instalação.

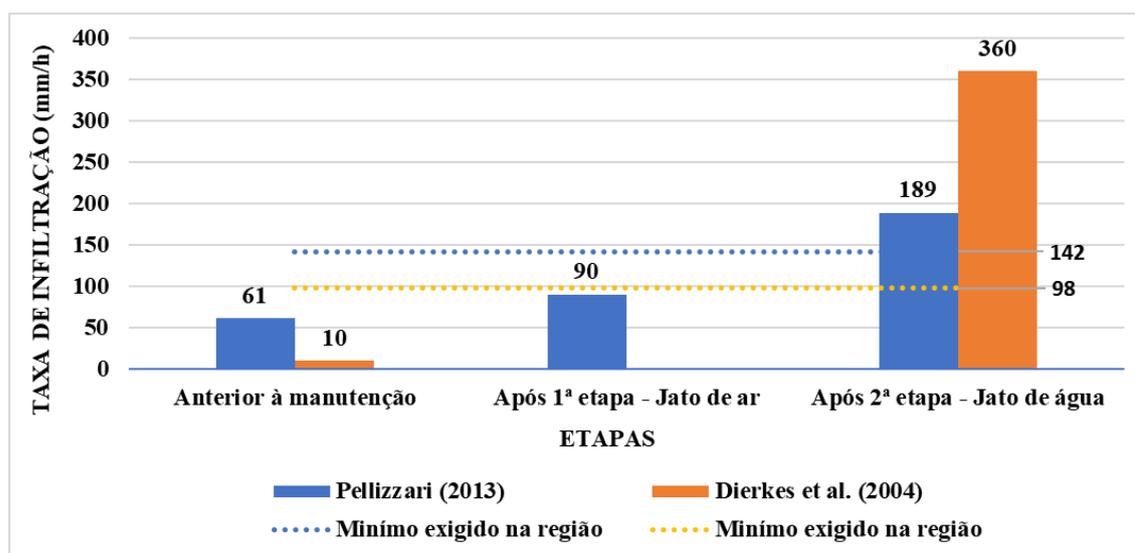
Pellizzari (2013) realizou testes no estacionamento que Accioli (2005) construiu para realizar sua pesquisa descrita anteriormente, afim de obter resultados sobre a capacidade de infiltração do asfalto permeável após um processo de restauração.

O procedimento adotado por Pellizzari (2013) foi bastante parecido com o experimento de Dierkes et al. (2004), no entanto, a manutenção foi dividida em duas etapas, sendo a primeira através da limpeza com jatos de ar e a segunda com jatos de água de alta pressão, tendo a infiltração medida a cada etapa com auxílio de um infiltrômetro. Antes do processo de restauração, a taxa de infiltração média encontrada foi de 61 mm/h, após a lavagem com jatos de ar e de água sob alta pressão, os valores médios obtidos foram de 90 mm/h e 189 mm/h, respectivamente.

Afim de mensurar valores próximos da realidade, os testes foram feitos em diversos pontos do estacionamento, encontrando assim valores médios que representassem o pavimento como todo. De acordo com as diretrizes do projeto, um valor mínimo aceitável de infiltração seria de aproximadamente 142 mm/h para as características da região. A Figura 30 sintetiza os resultados encontrados por Dierkes et al. (2004) e Pellizzari (2013).

Analisando os dados presente na Figura 30 é possível perceber que os valores médios de capacidade de infiltração feito por Pellizzari (2013) subiram de 61 mm/h para 189 mm/h após o processo completo de restauração. Já no experimento executado por Dierkes *et al.* (2004), os valores médios cresceram absurdamente, passando de 10 mm/h antes da manutenção para 360 mm/h após a limpeza.

Figura 30 - Taxa de infiltração de um pavimento permeável durante as etapas de manutenção.



Fonte: Autor (2020).

Tal diferença pode ser explicada pelos revestimentos utilizados por cada um deles, enquanto Pellizzari (2013) adotou asfalto permeável, Dierkes et. al (2013) adotaram blocos

intertravados de concreto, os quais são mais susceptíveis a colmatagem por terem sua infiltração concentrada nas juntas. Assim, uma limpeza completa da sua estrutura apresenta resultados mais significativos e de maior magnitude em relação aos demais revestimentos.

Além do mais, pode-se constatar que em ambas situações a capacidade de infiltração ultrapassou os limites mínimos exigidos para a região após o processo completo, o que comprova que com o uso de técnicas relativamente simples de manutenção é possível recuperar as condições iniciais de funcionamento de um pavimento colmatado.

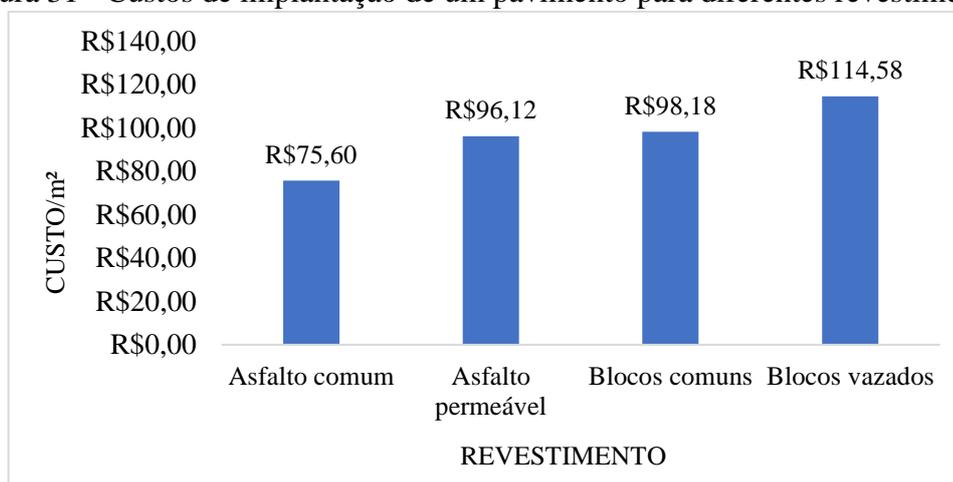
4.7. Custos de implantação

Na pesquisa feita por Acioli (2005), o autor realizou uma estimativa de custos de implantação dos dois tipos de revestimentos utilizados no estacionamento de estudo, asfalto permeável e blocos vazados. Os materiais utilizados na estrutura foram brita graduada simples para a base, filtro geotêxtil, asfalto pré misturado a frio e blocos vazados de concreto.

Além disso, o autor estimou ainda os gastos para um pavimento com as mesmas dimensões do estudado, porém revestido com asfalto e blocos de concreto convencionais. Os valores dos materiais correspondem aos gastos na época da construção e os valores de mão de obra foram fornecidos pela prefeitura da cidade.

Os custos por m^2 para os quatro tipos de revestimentos se encontram sintetizados na Figura 31. Verificamos que os blocos comuns possuem um custo superior ao asfalto convencional em 30%, bem como os blocos vazados apresentam um custo total maior em relação ao asfalto permeável de aproximadamente 20%. Essa diferença pode ser atribuída ao maior volume de escavação que os blocos necessitam e ao preço total do material, assim como a mão de obra para sua execução.

Figura 31 - Custos de implantação de um pavimento para diferentes revestimentos.



Em relação aos revestimentos asfálticos, os permeáveis apresentam um custo por metro quadrado de R\$ 96,12 e o asfalto comum R\$75,60, o que representa uma diferença de 27% entre os dois revestimentos. Apesar do preço unitário do material asfáltico não apresentar grandes variações entre os dois pavimentos, essa diferença de custos final acontece pelo elevado preço da mão de obra para a aplicação do revestimento permeável, dado que durante o assentamento deve-se tomar maiores cuidados para que os poros não sejam obstruídos. Aliado a isso, os custos referentes a manta geotêxtil são considerados apenas nos pavimentos permeáveis, elevando seu preço final em relação ao convencional.

Observa-se, também, que o pavimento permeável com blocos vazados teve um custo de aproximadamente 18% maior que do pavimento com blocos convencionais. Apesar dos blocos comuns exigirem um gasto com sistema de drenagem convencional, esse valor não se equipara aos gastos relativos à manta geotêxtil e ao reservatório de brita nos blocos permeáveis.

Nessa análise, destaca-se, ainda, o elevado gasto com os itens relacionados ao reservatório de britas. Os custos referentes a compra da brita, escavação e assentamento desse material, se somados totalizaram aproximadamente 30% do custo total da obra. Dessa forma, fica claro a importância de se realizar um dimensionamento correto da estrutura de armazenamento, pois sua execução interfere estreitamente no custo final.

Ainda sobre valores de implantação, temos o trabalho de Gonçalves e Oliveira (2014), que realizaram uma pesquisa sobre os custos de um pavimento revestido de asfalto permeável com reservatório de brita graduada simples. No entanto, os custos referentes a tubulação de drenagem e da manta plástica impermeável foram adicionados por ser tratar de um pavimento permeável sem infiltração.

O custo por m² estimado foi de aproximadamente R\$140,00, o que corresponde a um aumento de 40% em relação ao encontrado por Acioli (2005). Essa diferença pode ser explicada pelos custos adicionais mencionados e aos serviços de imprimação betuminosa ligante, que também foram considerados por Gonçalves e Oliveira (2014).

Embora os custos referentes a manutenção não tenham sido ponderados, alguns autores como Acioli (2005) e Virgiliis (2009) acreditam que os valores desses serviços variam de 2% a 5% do custo total de implantação, a depender das condições que o pavimento se encontra.

Pode-se verificar ainda que embora o custo de construção e manutenção dos pavimentos permeáveis seja elevado em relação aos convencionais, a economia nos gastos com obras de drenagem pode ser significativa. De acordo com Gonçalves e Oliveira (2014), os benefícios com a implantação deste sistema serão dados a longo prazo, portanto, devemos levar em consideração em uma análise completa de custos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em decorrência do processo de urbanização contínuo e acelerado nos grandes centros urbanos, adotar medidas alternativas que busquem mitigar os problemas decorrentes desse fenômeno são de extrema importância para a qualidade de vida da população. Neste sentido, essa pesquisa buscou tratar sobre a utilização dos pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial e aumento da capacidade de infiltração das superfícies.

Pela pesquisa bibliográfica desenvolvida verificou-se que os pavimentos permeáveis se destacam pela multifuncionalidade. Tais estruturas são capazes de reduzir praticamente todo o volume escoado em uma área, bem como recarregar o lençol freático com a melhora na qualidade da água percolada. Tal fato contribui para uma atenuação dos picos de cheia, fazendo com que as enchentes e alagamentos ocorram com menor frequência e intensidade. Não o bastante, sua utilização garante ainda uma maior segurança rodoviária, posto que os efeitos de aquaplanagem são eliminados, proporcionando um conforto aos usuários.

Quanto às suas características mecânicas, sobretudo nos critérios de resistência à tração e compressão, os pavimentos permeáveis possuem valores inferiores em relação aos convencionais, o que condiciona sua utilização a regiões de tráfego leve ou moderado. Porém, verifica-se que novas formulações estão sendo estudadas e aplicadas, principalmente com a adição de materiais alternativos que contribuem para um aumento nos valores de resistência sem comprometer sua capacidade de permeabilidade. Tal fato proporciona uma ampliação do seu campo de aplicação, sustentando que sua utilização pode ser extremamente vantajosa e eficaz.

Com relação ao processo construtivo, os pavimentos permeáveis se assemelham bastante aos convencionais, sendo que as etapas de colocação dos filtros geotêxteis e compactação das camadas necessitam de cuidados especiais. Apesar disso, há poucos profissionais da área que projetam e dimensionam esse sistema, bem como uma mão de obra disponível para a execução.

Com base nos dados analisados, os custos de implantação dos pavimentos permeáveis se apresentaram maiores que os convencionais em torno de 30%, considerando mão de obra e materiais utilizados, não contabilizando os valores referentes à manutenção, o que poderia torná-lo ainda mais desvantajoso nesse aspecto. No entanto, cabe destacar que alguns benefícios de sua implantação não foram ponderados, como a redução nos custos com sistemas de drenagem, reparações de danos nas vias e residências provocados por alagamentos e inundações, bem como no reaproveitamento das águas. Vantagens essas que não são ponderadas pelo Poder Público em uma análise de viabilidade econômica, fazendo com que sua utilização em áreas apropriadas seja pouco difundida.

Diante disso, é importante o desenvolvimento de mais estudos acerca dos seus benefícios e aplicações, fazendo com que sua utilização se torne mais recorrente. Em uma análise de custos por exemplo, ponderar todas variáveis envolvidas pode trazer conclusões mais satisfatórias acerca das suas vantagens. Estudos sobre formas e materiais que possibilitem um ganho de resistência mecânica se faz relevante para sua aplicação em larga escala. No mais, têm-se que apesar de ser uma tecnologia relativamente recente, sua aplicação pode contribuir bastante na solução dos problemas de drenagem urbana e infraestrutura, tornando uma alternativa eficiente, sustentável e inovadora para as cidades.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2015). NBR 16416 - **Pavimentos permeáveis de concreto: requisitos e procedimentos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.
- ÁBALOS, F. et. al. **Gestão de resíduos sólidos e impactos sobre a drenagem urbana**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 17 p., 2012.
- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 162 p. Dissertação (Mestrado em engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUN, J. A. **Avaliação dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v. 5, 21-29, 2000.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BAPTISTA, M. B.; OLIVEIRA, N. de. **Aspectos institucionais e de financiamento dos sistemas de drenagem urbana**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, v. 7, 29-49, 2002.
- BATEZINI, R.; BALBO, J. T. **Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. São Paulo, 2015.
- BECKER, B. K. **Manual do Candidato: Geografia**. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão, 2010.
- BERNUCCI, L. B. et. al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.
- BERTONI, J. C; TUCCI, C. E. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.
- BOTTEON, L. M. **Desenvolvimento e caracterização do concreto permeável para utilização em blocos intertravados para estacionamentos**. 2017. 93 p. Monografia (Obtenção do título de Engenheiro Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
- CANHOLI, A. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed., rev. e aum. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CASTRO, L. R. **Mezclas Drenantes**. In: 13º Congresso Ibero-Americano Del Asfalto, San José, Costa Rica, 2005.
- COOPER, A. M. **Estudo da viabilidade técnica da implantação de pavimentos permeáveis do tipo infiltração total para redução do escoamento superficial, na cidade de Alegre/RS**. 2013. 57 p. Monografia (Obtenção do título de Engenheiro Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegre, 2013.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico**: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicado a um trecho. 2011. 184 p. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

DANIELESKI, M. L. **Proposta de metodologia para avaliação superficial de pavimentos urbanos**: aplicação à rede viária de Porto Alegre. 2004. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia com ênfase em transportes) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DIERKES, C. et. al. **Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements**. In: International Conference on Urban Drainage. Portland, Óregon: American society of civil engineers, 2004, 1-13.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: IPR – 719, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de implantação básica de rodovia**. 3 ed. Rio de Janeiro: IPR – 742, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Pintura de ligação com ligante asfáltico**: especificação de serviço. Rio de Janeiro: Revisão da norma DNIT 145/2012-ES, 2012.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Imprimação com ligante asfáltico**: especificação de serviço. Rio de Janeiro: Revisão da norma DNIT 144/2012-ES, 2014.

GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M. **Considerações sobre inundações no Brasil**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 14 p., 2005.

GONÇALVES, A. B.; OLIVEIRA, R. H. **Pavimentos permeáveis e sua influência sobre a drenagem**. 2014. 12 p. Seminário (Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental) - Escola politécnica de São Paulo, São Paulo, 2014.

HÖLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana**: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental. 2011. 118 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LEGRET, M.; COLANDINI, V. **Effects of a porous pavement with reservoir structure on runoff water**: water quality and fate of heavy metals. Great Britain: Water Science and Technology, vol. 39, 111-117, 1999.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Melhores Práticas**: pavimento intertravado permeável. São Paulo: Associação Brasileiro de Cimento Portland, 2011.

MONTEIRO, A. C. N. **Concreto poroso**: dosagem e desempenho. 2010. 36 p. Monografia (Obtenção do título de Engenheiro Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MOTA, S. **Urbanização e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

PELLIZZARI, V. **Avaliação da eficácia na restauração da capacidade de infiltração da camada superior de pavimentos porosos**. 2013. 51 p. Monografia (Obtenção do título de Engenheiro Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

- PEREIRA, A. C. O. **Influência da drenagem subsuperficial no desempenho de pavimentos asfálticos**. 2003. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- PINTO, L. L. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. 283 p. Tese (Doutorado em engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PRAIA GRANDE. Primeira via de Praia Grande com pavimentação drenante. Praia Grande - SP. 2018. Disponível em: <http://praiagrande.sp.gov.br/pgnoticias/noticias/noticia_01.asp?cod=46268>. Acesso em: 04 de ago. de 2020.
- RUSHTON, B. **Enhanced parking lot design for stormwater treatment. International Conference on Urban Drainage**. Oregon, USA: Global Solutions Urban Drainage, 2002.
- SCHUELER, T. R. **Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Design Urban BMPs**. Washington: Metropolitan Council of Government, 1987.
- SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2001.
- SILVA, K. C.; POLETO C. **Drenagem urbana sustentável: aspectos hidrológicos, influência dos sedimentos e o reequilíbrio dos ciclos naturais**. Foz do Iguaçu: Interciência, 2017.
- STORCK, F. **Avaliação da influência de pavimentos permeáveis no amortecimento de vazões de escoamento de águas pluviais em um condomínio em Curitiba (PR)**. 2017. 65 p. Monografia (Obtenção do título de Engenheiro Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- SUDERHSA, C. **Manual de drenagem urbana: região metropolitana de Curitiba/PR - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**. Curitiba, 2002.
- SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABACCH, F.I. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- Tucci, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre: UFRGS, 1998.
- URBONAS, B.; STAHR, P. S. **Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheia**. 2009. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- YANG, J., JIANG, G. Experimental study on properties of previous concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*: Elsevier, vol. 33, 381-386, 2003.
- WATANABE, S. **Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes**. Great Britain: Water Science and Technology, vol. 32, 25-32, 1995.