



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII - ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

CELIANE CABRAL BELARMINO

**APLICABILIDADE E EFICÁCIA DOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS EM
CAMADAS POROSAS NO APRIMORAMENTO FUNCIONAL DE VIAS DE
TRÁFEGO URBANAS E RURAIS: UM ESTUDO BIBLIOGRÁFICO**

**ARARUNA – PB
2021**

CELIANE CABRAL BELARMINO

**APLICABILIDADE E EFICÁCIA DOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS EM
CAMADAS POROSAS NO APRIMORAMENTO FUNCIONAL DE VIAS DE
TRÁFEGO URBANAS E RURAIS: UM ESTUDO BIBLIOGRÁFICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Pavimentação.

Orientador: Prof. Esp. Lauandes Marques de Oliveira.

**ARARUNA – PB
2021**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B425a Belarmino, Celiane Cabral.
Aplicabilidade e eficácia dos revestimentos asfálticos em camadas porosas no aprimoramento funcional de vias de tráfego urbanas e rurais [manuscrito] : um estudo bibliográfico / Celiane Cabral Belarmino. - 2021.
86 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2021.

"Orientação : Prof. Esp. Lauandes Marques de Oliveira, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Revestimento asfáltico. 2. Permeabilidade. 3. Análise de estrutura. I. Título

21. ed. CDD 625.8

CELIANE CABRAL BELARMINO

**APLICABILIDADE E EFICÁCIA DOS REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS EM
CAMADAS POROSAS NO APRIMORAMENTO FUNCIONAL DE VIAS DE
TRÁFEGO URBANAS E RURAIS: UM ESTUDO BIBLIOGRÁFICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

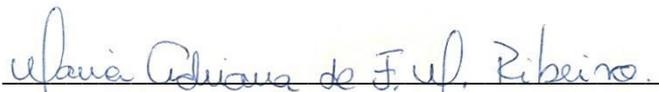
Área de concentração: Pavimentação.

Aprovada em: 03/06/2021.

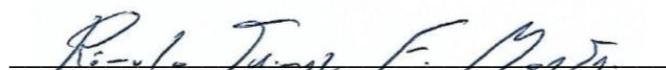
BANCA EXAMINADORA



Prof. Esp. Lauandes Marques de Oliveira (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Rômulo Thomaz de Figueiredo Borja
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

*Dedico a Deus, por todo sustento e
orientação, e aos meus pais, pilares da minha
humanidade, pelo amor e encorajamento.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por fortalecer, capacitar e conduzir a minha vida. Gratidão pelo amor incondicional e presença contínua. Mesmo tão pequena e frágil, me fizeste capaz de subir um grande degrau, portanto toda honra e glória seja direcionada a Ti.

A minha doce e amável mãe, Maria Salete, extremamente cuidadosa e atenciosa, exemplo de força e acolhimento, sempre a torcer e orar por mim. Obrigada por tanta dedicação e proteção, pelos ensinamentos e por me guardar sempre no seu imenso coração.

Ao meu querido e amado pai, Francisco Belarmino, extremamente orgulhoso e prestativo, minha coragem. Através de ti descobri e me apaixonei pela construção civil. Obrigada por não medir esforços e dar oportunidades que a vida não te proporcionou.

A minha amorosa irmã, Celine Cabral, meu tesouro, exemplo de inteligência e determinação. Você acreditou quando eu não conseguia, ouviu, compreendeu, chorou junto e me reergueu. Obrigada por ser tão atenciosa, presente e proporcionar o melhor abraço.

Ao amor da minha vida, Antônio Marcos, meu esposo, a quem jurei compartilhar meus dias por toda a eternidade. Obrigada por participar e apoiar meu sonho, pela dedicação e entrega, paciência, companheirismo e compreensão no decorrer desses anos.

Aos meus avós, Maria Cabral (*in memoriam*), por tanto amor e acolhimento durante sua existência, sempre sentirei sua falta, Maria do Rosário, Antônio Belarmino e Severino Alves, sou grata pelos conselhos e princípios transmitidos com as suas histórias.

Aos amigos presenteados pela universidade, essenciais na conquista e no amenizar das dificuldades. Anderson Matheus, irmãozinho querido, você foi meu combustível e força. Lindiane Araújo dividiu um lar e ensinamentos. Fagna Fernandes, compartilhamos histórias e frustrações, juntas vivemos o momento mais épico do curso. Ruan Oliveira, o sábio encrenqueiro, nunca esqueça: querer não é poder. Rafaela Salustino, dona das melhores gargalhadas, grata por dividir conosco inteligência e felicidade. Lidja Rosa você concebeu calma em meio ao caos com suas palavras. Grata a Deus por ter cruzado nossos caminhos, sem vocês era impossível. Obrigada por tantos momentos que guardarei pra sempre.

A todos os professores e instituições que colaboraram no meu aprendizado ao decorrer da vida, especialmente ao professor e orientador Lauandes Marques, por todo auxílio na realização deste trabalho, e a UEPB, por tamanho acolhimento.

A todos familiares e amigos que ansiaram juntos comigo na concretização deste ideal.

Muito obrigada!

RESUMO

Desde os primórdios, as estradas são sinônimas de desenvolvimento social e econômico por propiciar a movimentação de cargas e pessoas. Com a evolução dos meios de transportes e a urbanização, surgiram novos requisitos a qualidade do pavimento, sendo necessário conciliar eficiência estrutural e funcional como garantia de bom desempenho. Mediante problemas advindos da impermeabilização, estruturas que permite a infiltração apresentam como um meio de agregar qualidades funcionais, colaborando na mitigação dos efeitos da aquaplanagem e alagamentos urbanos, além de reduzir a propagação de ruídos. Nessa perspectiva, foi realizado um estudo bibliográfico acerca dos pavimentos permeáveis, enfatizando as peculiaridades que promovem aprimoramento da capacidade funcional, de modo a contribuir no conforto e segurança dos usuários e residentes próximos as vias. Diante disso, foi inferida por meio de trabalhos atuais, a eficiência funcional e estrutural da aplicação da estrutura porosa, tanto em vias interurbanas como urbanas. Verificando-se, a utilização mais proveitosa do pavimento poroso de uma camada em locais de tráfego maiores, em razão do efeito limpante que contribui no retardamento da colmatação e na menor geração de ruídos, em virtude das velocidades superiores. Enquanto isso, a dupla camada se adequa as diversas características do tráfego por propagar menores índices de ruído sob todas as condições e possuir uma camada superior fina filtrante que minimiza o entupimento da estrutura, assegurando absorção acústica e hidráulica por períodos mais longos.

Palavras-Chave: Revestimentos drenante. Permeabilidade. Estruturas porosas. Aspectos funcionais.

ABSTRACT

Since the beginning, the roads have been synonymous with social and economic development, as they allow the movement of loads and people. With the evolution of means of transport and urbanization, new requirements have arisen regarding the quality of the pavement, making it necessary to reconcile structural and functional efficiency as a guarantee of good performance. By means of problems arising from waterproofing, structures that allow infiltration present as a means of aggregating functional qualities, helping to mitigate the effects of aquaplaning and urban flooding, in addition to reducing the propagation of noise. In this perspective, a bibliographic study was carried out on permeable pavements, emphasizing the peculiarities that promote the improvement of functional capacity, in order to contribute to the comfort and safety of users and residents close to the roads. In view of this, it was inferred through current works, the functional and structural efficiency of the application of the porous structure, both in long-distance and urban roads. As a result, the more profitable use of the porous layer of a layer in larger traffic areas, due to the cleaning effect that contributes to the delay in clogging and the lower generation of noise, due to the higher speeds. Meanwhile, the double layer adapts to the diverse characteristics of the traffic by propagating lower noise levels under all conditions and having a thin upper filtering layer that minimizes the clogging of the structure, ensuring acoustic and hydraulic absorption for longer periods.

Keywords: Draining coatings. Permeability. Porous structures. Functional aspects.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das etapas do estudo bibliográfico.....	18
Figura 2 – Configuração de uma estrada Romana.....	20
Figura 3 – Seção transversal de um pavimento.....	23
Figura 4 – Distribuição de cargas num pavimento.....	25
Figura 5 – Camadas básicas do pavimento.....	25
Figura 6 – Notícias de alagamento em cidades brasileiras.....	31
Figura 7 – Representação da hidroplanagem.....	35
Figura 8 – Acidentes em decorrência de Hidroplanagem.....	36
Figura 9 – Hidrologia de um pavimento impermeável (a) e permeável (b).....	44
Figura 10 – Superfície de um revestimento de concreto asfáltico convencional e drenante	45
Figura 11 – Diagrama esquemático.....	45
Figura 12 – Percolação em: (a) pavimento asfáltico poroso, (b) pavimento asfáltico com revestimento poroso e (c) pavimento asfáltico convencional.....	48
Figura 13 – Tipos de pavimentos com reservatório estrutural.....	50
Figura 14 – Vista superior e lateral dos sistemas de infiltração do pavimento permeável	51
Figura 15 – Sistemas de infiltração total.....	52
Figura 16 – Sistemas de infiltração parcial.....	52
Figura 17 – Sistemas sem infiltração.....	53
Figura 18 – Estrutura de um pavimento permeável.....	54
Figura 19 – Sobrecamada porosa mais revestimento convencional.....	55
Figura 20 – Aplicação de geomembrana conjugada com geotêxtil em reservatórios.....	57
Figura 21 – Mistura asfáltica drenante.....	59
Figura 22 – Pavimento permeável com a superfície colmatada.....	63
Figura 23 – Comportamento da CPA em dias de chuva.....	66
Figura 24 – Estrutura de asfalto poroso de camada dupla.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da colmatção entre pavimentos tratados com limpeza e não tratados.....	64
Gráfico 2 – Geração de níveis de ruído para diferentes tipos de superfície.....	70
Gráfico 3 – Gráfico comparando o SPBI em CPA da BR-158.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Nível de Pressão Sonora medidos em diferentes cidades.....	40
Tabela 2 –	Faixas granulométricas para dosagem da camada porosa de atrito.....	67
Tabela 3 –	Graduação dos agregados para asfalto poroso de duas camadas.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Terminologia aplicada a pavimentos porosos.....	56
---	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINT	Associação Brasileira de Não Tecidos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPA	Camada Porosa de Atrito
CPX	Close-Proximity
DIRENG	Diretoria de Engenharia da Aeronáutica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPA	Environmental Protection Agency
ES	Especificação de Serviço
FWD	Falling Weight Deflectometer
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
NPS	Nível de Pressão Sonora
OMS	Organização Mundial da Saúde
PM	Perda de Massa
RT	Resistência à Tração
SPB	Statistical Pass-by
SPBI	Statistical Pass-by Index
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
VRD	Valor de Resistência à Derrapagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA	15
3	OBJETIVOS	16
3.1	Objetivo Geral	16
3.2	Objetivos Específicos	16
4	METODOLOGIA	17
4.1	Categorização da pesquisa	17
4.2	Desenvolvimento do estudo bibliográfico	17
5	REFERENCIAL TEÓRICO	19
5.1	Desenvolvimento socioeconômico atrelado à evolução das estradas	19
5.2	Caracterização e estrutura de um pavimento	22
5.3	Funcionalidade de um pavimento	27
5.3.1	<i>Sobrecarga dos sistemas de drenagem e alagamentos</i>	29
5.3.2	<i>Situações adversas: hidroplanagem ou aquaplanagem</i>	32
5.3.3	<i>Geração e propagação de ruídos</i>	37
5.4	Pavimento permeável	41
5.4.1	<i>Primeiros estudos e aplicações</i>	46
5.4.2	<i>Tipologia e estrutura</i>	48
5.4.3	<i>Materiais componentes</i>	57
5.4.4	<i>Vantagens e desvantagens</i>	60
5.5	Pavimentos porosos de camada simples e camada dupla	65
5.5.1	<i>Comportamento do pavimento poroso tipo CPA em relação ao CA</i>	71
5.5.2	<i>Comportamento do pavimento poroso de dupla camada em relação ao simples</i>	75
6	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Perante a expansão e desenvolvimento da humanidade, as transações comerciais induziram a movimentação de pessoas e mercadorias por entre as cidades primitivas, de modo que a necessidade de caminhos favoráveis fosse responsável pela concepção das primeiras vias de pedras assentadas sobre argamassa.

Com o aprimoramento dos meios de transportes e as maiores solicitações exigidas pelo tráfego, a estrutura e os materiais constituintes do pavimento sofreram mudanças no decorrer dos anos, sendo encontradas, na contemporaneidade, rodovias revestidas com material asfáltico ou placas de concreto que se encarrega pela circulação dos meios de transportes rodoviários. No âmbito urbano as avenidas e ruas de maior importância, geralmente, possuem revestimento asfáltico sobre as camadas granulares, enquanto as demais são cobertas com paralelepípedos graníticos.

Indiscutivelmente uma via com pavimento de boa qualidade contribui para uma locomoção mais segura e eficiente de cargas e pessoas, acarretando benefícios à economia das cidades. Porém, caso não atenda aos requisitos impostos pelas particularidades locais, as estradas passam a ser ineficientes, apresentando desconforto e riscos à segurança daqueles que a trafegam. Assim, tanto a estrutura quanto os aspectos funcionais do pavimento devem ser estudadas e analisadas para o bom desempenho das vias urbanas e rurais, sobretudo em países como o Brasil que detém do sistema rodoviário como o principal meio de deslocamento (DRESCH, 2016).

Dentre as características apresentadas por um pavimento constituído de material derivado de petróleo, a impermeabilidade é responsável pela redução do volume de água que infiltra na superfície revestida. Esse fator, principalmente nas rodovias, pode causar o efeito denominado hidroplanagem que motiva acidentes automobilísticos, enquanto que nas cidades contribui para o transporte de poluentes e propagação de doenças associadas aos alagamentos.

Diante desses problemas, a necessidade da redução do acúmulo de água contribuiu na realização de pesquisas com a finalidade de melhorar o desempenho das vias em dias chuvosos. Assim o pavimento permeável ou drenante foi originado com o intuito de mitigar os problemas relacionados com a impermeabilidade do pavimento usual, tornando possível a percolação da água nas camadas por meio dos vazios existentes, promovendo a drenagem urbana e o abastecimento do lençol freático, somado a redução na geração dos ruídos oriundos

do contato do pneu com o asfalto (GOUVEIA, 2019). Tais fatores melhoram a qualidade de vida e segurança dos usuários e da população residente próxima às vias.

Em vista disso, entre os revestimentos com características permeáveis a CPA, Camada Porosa de Atrito, apresenta um desempenho satisfatório em várias regiões do mundo. Neste, apenas a camada mais superficial apresenta poros que permitem a entrada de água, a qual será direcionada aos dispositivos de drenagem.

Entretanto, mesmo diante dos benefícios que a mistura agrega na funcionalidade do pavimento, a ocorrência de colmatação significativa, com o passar dos anos, ocasiona perda na permeabilidade pela obstrução dos poros (FURTADO, 2017). Assim, a camada porosa deixa de apresentar sua principal característica e passa a atuar como um revestimento impermeável.

Em virtude dessa problemática, o pavimento poroso de duas camadas começou a ser utilizados em países da Europa e da Ásia, com o intuito de retardar os efeitos da colmatação e prolongar as vantagens associadas à capacidade funcional dos revestimentos porosos de uma camada, a exemplo da CPA. Desse modo, a dupla camada certifica que os benefícios associados à porosidade do pavimento possam ocorrer por um tempo maior comparado ao de uma camada, contribuindo no melhor funcionamento, segurança e qualidade de vida aos usuários.

2 JUSTIFICATIVA

Ao compreender o valor socioeconômico do transporte rodoviário no cenário brasileiro, percebe-se que as vias pavimentadas devem certificar segurança e conforto ao usuário, de modo a conciliar boa atuação estrutural e funcional a fim de contribuir para maior eficiência na circulação de cargas e pessoas.

Tal qual a estrutura do pavimento, o desempenho funcional coopera na qualidade de vida dos habitantes as margens de vias e a segurança daqueles que a utilizam. Problemas associados à impermeabilização do revestimento asfáltico e os altos ruídos ocasionados pelo tráfego geram riscos a saúde e até mesmo a vida das pessoas. Assim, é extremamente importante a observação acurada da sua capacidade operante.

Dessa forma, a aquisição de conhecimentos referentes ao uso, benefícios e técnicas do pavimento permeável contribui para melhor percepção quanto à utilização em locais que sinaliza necessidade de aprimoramento funcional no revestimento. No Brasil, o pavimento poroso ainda é pouco utilizado, sendo necessários estudos mais aprofundados considerando as particularidades do país para possível redução de alagamentos e níveis de ruídos em vias urbanas, bem como da lâmina de água presente sobre a superfície das rodovias em dias chuvosos.

Diante disso, é justificável o estudo comparativo das singularidades e emprego dos pavimentos porosos de uma e duas camadas, especialmente pela carência de trabalhos brasileiros quanto ao segundo, para aprimoramento do revestimento, sobretudo, na zona urbana, a fim de reduzir acidentes, alagamentos e danos à saúde da população.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Abordar as peculiaridades dos pavimentos permeáveis que contribuem no melhoramento da capacidade funcional das vias de tráfego, a fim de minimizar riscos à segurança e conforto ambiental aos usuários e residentes próximos.

3.2 Objetivos Específicos

- Esclarecer acerca da tipologia e estrutura dos pavimentos permeáveis e não permeáveis;
- Aferir quanto à eficiência funcional na mitigação de problemas derivados da impermeabilidade e geração de ruídos;
- Alegar e apontar o tipo de pavimento poroso mais indicado na aplicação das vias urbanas e rurais.

4 METODOLOGIA

4.1 Categorização da pesquisa

Apontada como básica, a análise compreende um tema de interesse mundial, não ocorrendo aplicação prática no decorrer das etapas desenvolvidas. Conforme Gil (2017, p. 32), a natureza dessa pesquisa “[...] reúne estudos que tem como propósito preencher uma lacuna no conhecimento”, assim, contribui de maneira significativa na aquisição de informação científica e tecnológica.

Materializada de forma exploratória, a investigação colabora para melhor percepção sobre o referido assunto, que, conforme expõem Köche (2011), tem como objetivo principal “descrever ou caracterizar a natureza das variáveis que se quer conhecer”, sendo este efetivado através de um estudo bibliográfico realizado a partir de livros, revistas, artigos, monografias, dissertações e teses publicadas nacional e internacionalmente.

Segundo Gil (2017, p. 41), “nas pesquisas quantitativas os resultados são apresentadas em termos numéricos e, nas qualitativas, mediante descrições verbais”, com isso, tem-se que a abordagem adveio de forma qualitativa, uma vez que os resultados da análise não incidiram por meio de termos numéricos. Com isso, o estudo foi direcionado na interpretação, comparação e conclusão quanto ao uso de pavimento poroso para melhorias relacionadas à funcionalidade do revestimento a partir de estudos anteriores.

4.2 Desenvolvimento do estudo bibliográfico

Sendo perceptível a existência de problemas impulsionados com a impermeabilização de pavimentos asfálticos usuais, sobretudo em dias de chuva, e o desconforto gerado a partir dos altos índices de ruídos no tráfego de veículos em regiões habitadas, que contribuem para a redução da segurança e comodidade da população, o pavimento poroso surge como uma opção para proporcionar melhorias na funcionalidade do revestimento e mitigação dessas questões.

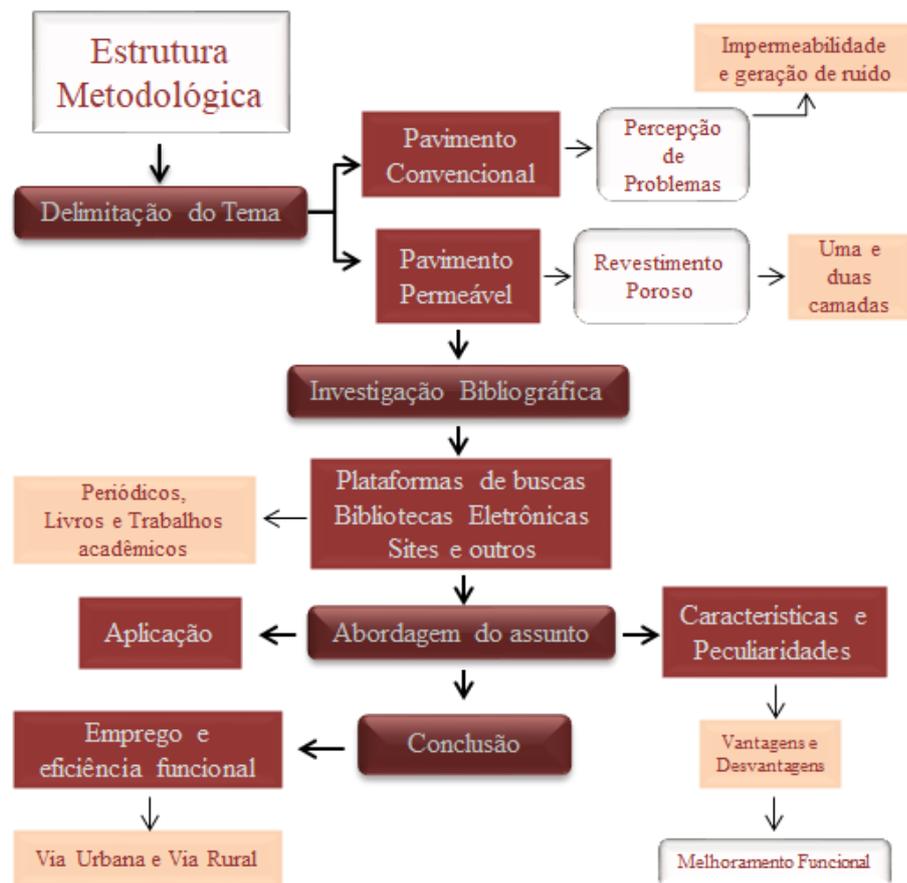
Assim, o tema discorrido nesse estudo foi delimitado visando ampliar informações acerca dos pavimentos porosos de uma e duas camadas. Para tanto, a pesquisa sobreveio em bibliotecas eletrônicas, sites e plataformas de buscas com o intuito de recolher o máximo de material que explane sobre o tema de interesse.

Com a investigação e coleta de trabalhos, decorreu-se a leitura minuciosa dos arquivos a fim de abstrair os que se enquadram aos objetivos do estudo, sendo, portanto, mais apropriados. Obteve-se ênfase aqueles que expuseram as características dos pavimentos permeáveis, bem como comprovação da eficiência dos pavimentos porosos de uma e duas camadas através de ensaios e resultados alcançados com sua aplicação.

Partindo da ponderação a respeito do pavimento drenante e da análise comparativa dos atributos que envolvem a utilização dos dois tipos de pavimentos porosos, o estudo findou verificando a melhoria na funcionalidade do revestimento atribuída à colocação da camada porosa, que permite a absorção líquida e sonora. Desse modo, a partir do conteúdo é possível esclarecer quanto à utilização do pavimento nas vias urbanas e rurais, atentando as suas características, manutenção e as necessidades impostas por cada caso.

No fluxograma apresentado na Figura 1, as etapas ocorridas no desenvolver da pesquisa podem ser vistas de forma resumida, facilitando a compreensão do estudo bibliográfico efetivado.

Figura 1 – Fluxograma das etapas do estudo bibliográfico.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 Desenvolvimento socioeconômico atrelado à evolução das estradas

No perpassar da vida humana a transição por entre regiões é um evento comumente, uma vez que a espécie é constituída por seres dinâmicos em busca de ambientes satisfatórios a sobrevivência, que viabilize qualidade de vida individual e familiar. De início, a locomoção não era realizada a partir de uma trajetória específica, assim sua concepção e avanço foram associados à necessidade dos povos por locais apropriados e seguros.

Crucial para o fluxo de cargas e pessoas, elas promovem crescimento as cidades circunvizinhas, sendo sua origem e difusão concedida com a evolução humana e dos meios de transporte. Segundo Maré (2011, p. 3) “estudar a história das estradas, remete à historia da humanidade, passando pelo povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercambio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento”.

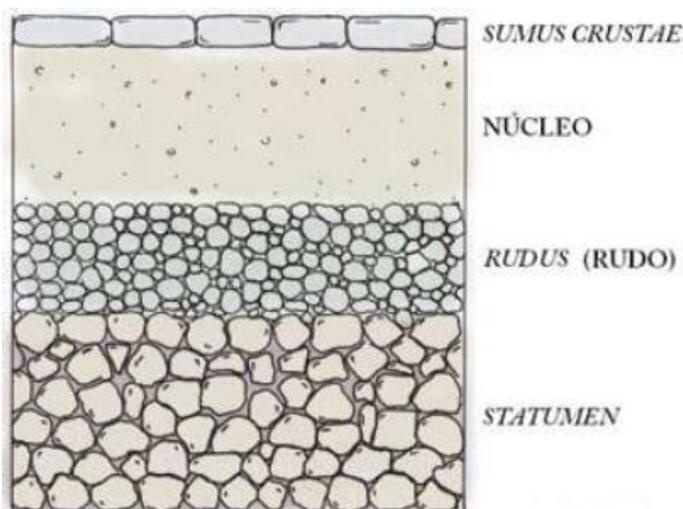
Desde os nômades as civilizações atuais, a finalidade dos deslocamentos foram modificadas de acordo com a evolução humana, iniciando na busca por fontes de alimentos, expansão territorial, comercialização, às atividades de turismo e lazer.

No antigo Egito a carência de estradas se deu com as construções das pirâmides que, de acordo com Maré (2011), proporcionou caminhos que estabeleciam ligações comerciais e religiosas, apesar disso foram os romanos que criaram o conceito de estrada usadas no mundo moderno com a presença do planeamento e construção, impulsionados pelos interesses militares aliados com a necessidade de expansão.

Mesmo de forma arcaica as vias romanas eram construídas a partir da distribuição de camadas, cada qual com material específico, compondo uma estrutura que se assemelha com a empregada na pavimentação atual.

Distribuído sobre uma seção reta e plana, os romanos fugiam de obstáculos, como colinas, e construíam suas estradas sobre um leito escavado com largura que permitisse a passagem de dois veículos da época. Na figura 2, a seguir, pode-se observar a distribuição das camadas de uma estrada Romana de acordo com os materiais empregados.

Figura 2 – Configuração de uma estrada Romana.



Fonte: Maré, 2011

Conforme explanado por Maré (2011), a primeira camada locada no terreno e mais profunda tem como característica uma maior altura, cerca de 30 a 60 cm, e é denominada “statumen”, sendo constituída com pedras grandes. Após esta, a “rudus”, com menor granulometria, apresenta areia e gravilha nos seus 20 cm, enquanto que na “nucleus”, com espessura semelhante a anterior, encontram-se pedra triturada por lajes talhadas e ajustadas, dependendo da região, por granito ou basalto. Por fim, na camada mais superficial, sobrevinha o pavimento liso e uniforme com bermas delineadas.

Com o avanço diretamente ligado aos meios de transporte, a evolução e o desenvolvimento das variadas técnicas aplicadas na construção de estradas e rodovias se deram pela necessidade de suporte crescente, que exigiu a presença de materiais mais resistentes com a garantia de um melhor uso atrelado à segurança e à economia. Conforme pondera Bernucci *et al.* (2006), grande parte das estradas originadas na antiguidade passaram a ser asfaltadas com a chegada da modernidade.

Considerando o Brasil, a mais antiga via construída que se tem conhecimento é a Estrada Caminho do Mar em São Paulo, iniciada em 1560, no governo de Mem de Sá, perante a necessidade de obter caminhos responsáveis por ligar São Vicente ao Planalto Piratininga. Em 1922 a estrada foi pavimentada em concreto, sendo atualmente sua serventia restrita apenas para fins turísticos (FRANZ, SEBERINO; 2012).

Como expõem Bernucci *et al.* (2006), no decorrer das décadas de 1940 e 1950 a construção das rodovias brasileiras foram incentivadas a partir da criação do Fundo Rodoviário Nacional (1946), da Petrobras (1953), do Instituto de Pesquisas Rodoviárias

(1958) e da Associação Brasileira de Pavimentação (1959). Desde então, o país passou a assumir o transporte rodoviário como sendo o principal meio de deslocamento no interior do território. Em concordância, Fonseca (2016, p. 5) explica que “a maior parte do transporte de cargas e pessoas é feita via estradas, tanto para os transportes intermunicipais e interestaduais, quanto para o transporte urbano”.

Tendo em vista a necessidade de locomoção e o progresso nos cenários social e econômico agregado pelo setor, é fundamental para uma nação que “[...] haja investimento em transporte, pois ao se diminuírem os custos e as distâncias cria-se a produtividade, proporcionando o desenvolvimento de setores econômico e regional” (BEUTER, 2020, p. 19).

Dessa forma, para o bom desempenho do sistema de transporte é necessário observar as particularidades do projeto e dos materiais que preencherão a estrutura do pavimento no transcorrer da via. Considerando, ainda, a organização da vida humana em cidades, as vias urbanas tornaram-se fundamentais para o bem-estar, qualidade de vida e desenvolvimento, exigindo atenção análoga às rodovias.

Ruas detentoras de bom pavimento possibilitam mobilidade e segurança, no entanto conforme pontua Nabeshima, Orsoli e Santos (2011), a falta da pavimentação urbana promove o surgimento de diversos problemas aos moradores, dentre os quais é possível citar: dificuldade de atendimentos emergenciais, linhas de ônibus ausentes, carência nos sistemas de saneamento básico, acesso dificultoso das autoridades policiais que causa insegurança a população, difícil acesso e riscos a saúde pela grande incidência de material de pequena granulometria. Em virtude desses e outros fatores, a composição do pavimento das cidades deve ser observado com cautela, considerando as características dos locais de aplicação.

Parcela considerável das cidades brasileiras possuem ruas com revestimentos em paralelepípedos ou asfalto, sendo possível encontrar ruas em solo natural, já nas rodovias a camada mais superficial do pavimento é constituída de material asfáltico ou placas de concreto. No que diz respeito às demais camadas, são diversos os materiais que podem ser utilizados, sendo todo o planejamento e concepção idealizados de acordo com as exigências normativas e locais.

Com as novas cobranças referentes à qualidade do revestimento no decorrer dos anos, a capacidade estrutural da via, somente, não garante o bom desempenho, assim, passou a ser indispensável à análise da funcionalidade que proporciona segurança e conforto aos usuários e moradores adjacentes. Desse modo, pavimentos que apresentam boa resistência ao tráfego associados a menor geração de ruídos e acúmulo de águas passou a ser objeto de estudo e alvo de alcance para melhor atender a sociedade moderna.

5.2 Caracterização e estrutura de um pavimento

Mediante o desdobramento dos anos o conceito de pavimento foi sendo modificado com o desenvolvimento das técnicas atribuídas pelos povos, alcançando assim, o entendimento que prevalece na atualidade de uma estrutura dividida por camadas, onde cada qual, composta por materiais distintos, atua em conjunto suportando as cargas oriundas do tráfego.

Conforme destacado no Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 95), o pavimento trata-se de uma “[...] superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infra-estrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito”.

Para Bernucci *et al.* (2006), a estrutura formada por múltiplas camadas é localizada sobre uma superfície final de terraplanagem, designada a suportar os esforços do tráfego e do clima de forma técnica e econômica, de modo a proporcionar locomoção em melhores condições de conforto, economia e segurança.

Alguns autores ao descreverem o esqueleto do pavimento, enfatizam a presença de tensões ganhas a partir do tráfego de veículos e suas consequências. Como exemplo, Silva (2005) revela que além de serem encontradas superpostas, cada camada possui uma resistência e capacidade de deformação distinta, que juntas formam um conjunto complexo em relação ao cálculo de tensões e deformações.

Silva (2018, p. 15) expõe que a estrutura tem como dever “[...] distribuir as solicitações de carga, diminuindo as tensões e as deformações ou patologias, com o intuito de assegurar um desempenho satisfatório da via por o mais longo de tempo possível”. Em síntese, Zagonel (2013, p. 25) estabelece que:

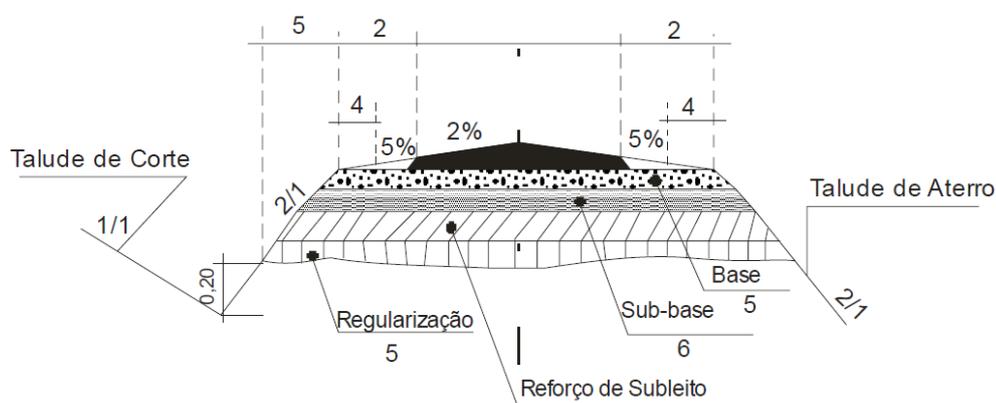
[...] o pavimento constitui-se de multicamadas de espessuras constantes transversalmente ao eixo da estrada. A estrutura do pavimento é submetida a tensões e deformações que derivam do tráfego e das condições ambientais. O dimensionamento da estrutura do pavimento deve ser compatibilizado com a resistência de cada material empregado em cada uma das camadas e no terreno de fundação (subleito).

Conforme visto, diversas são as definições encontradas na literatura a respeito, onde cada autor coopera no enfoque de alguma característica equivalente ao pavimento, de tal modo que o vislumbre das variadas interpretações permite maior compreensão de sua complexidade.

De fato, camadas o formam, sendo a organização, composição e quantidade dependente do tipo do pavimento, assim como das características da via pertencente e de outros fatores considerados no decorrer da consumação do projeto de pavimentação. Diante disso, Pereira (2014) classifica as divisões do pavimento como: camada de fundação, camada da estrutura do pavimento e camada final do revestimento responsável pela recepção do tráfego.

Em suma, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) esclarece a respeito das camadas ocorrentes em um pavimento, ilustradas de acordo com a Figura 3 e descritas logo a seguir em concordância com o mesmo.

Figura 3 - Seção transversal de um pavimento.



Fonte: Manual de pavimentação do DNIT (2006).

Similar ao sistema predial onde as cargas são direcionadas ao alicerce, a estrutura do pavimento direciona as cargas para o terreno natural de fundação denominado subleito. Sobre ele pode ser encontrada a camada de regularização que, como mostra a figura, não possui espessura análoga em todos os pontos e tem como função modelar a fundação tornando-a uniforme.

Após a regularização do terreno a camada de reforço do subleito é inserida na estrutura com espessura contínua e menor que as camadas localizadas sobre ela. Sua efetivação advém a partir de circunstâncias técnicas e econômicas. Quanto a sua composição se dá com materiais com atributos geotécnicos inferiores aos das camadas de sub-base e base, contudo superior aos materiais do subleito.

Seguidamente, a camada de sub-base auxilia a base de forma técnica e econômica quando não for apropriado acomodá-la diretamente sobre o reforço ou regularização do subleito. Com material de qualidade melhor que a camada inferior pode ser composta, além

de solo e misturas de solos, por solos estabilizados quimicamente e até mesmo de materiais pétreos.

Destinada a suportar, reduzir e distribuir esforços do tráfego, a camada de base é a mais importante para a estrutura do pavimento. Localizada sob o revestimento é constituída por materiais granulares de boa qualidade, pois qualquer agravo nessa camada resulta em problemas sérios no pavimento.

Finalmente, a camada de revestimento compreende a de maior custo, sendo a que atua diretamente sobre o fluxo de veículos. Suas características impermeáveis dificulta a entrada de água nas camadas inferiores e transmite as solicitações atribuídas. Ademais, coopera na comodidade e segurança dos usuários devendo resistir ao desgaste a fim de manter o máximo de tempo funcionando com boa qualidade.

Em alguns casos a depender do tipo de pavimento e das peculiaridades do tráfego, a estrutura apresenta um número menor de camadas. Para Alves (2019), a ausência de algumas camadas pode ocorrer em função do tráfego e dos materiais a disposição. Como complementa Breitenbach (2016), o dimensionamento destas tem como objetivo a recepção e transmissão de esforços de maneira que as pressões sejam aliviadas sobre as camadas inferiores menos resistentes.

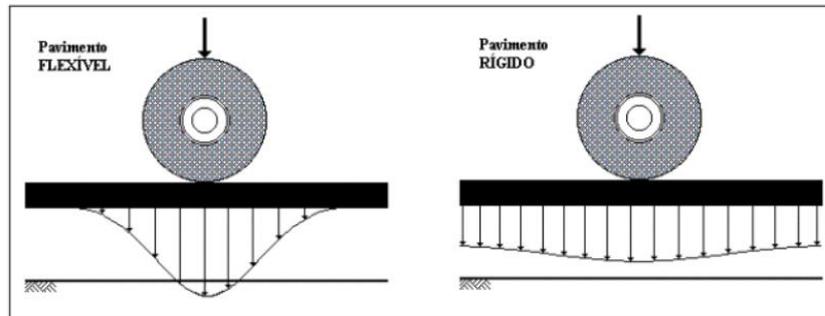
Frequentemente é possível se deparar com pavimentos enquadrados em duas tipologias: flexível e rígido, contudo, um terceiro, denominado semi-rígido, é tratado por diversos autores. “Esta distinção é baseada na sua estrutura, visto que cada um destes pavimentos apresenta uma constituição diferente, com camadas diferenciadas, relativamente a características geométricas e mecânicas” (PEREIRA, 2010, p. 15).

Conforme o Manual de Pavimentação de DNIT (2006) é considerado flexível quaisquer pavimentos onde todas as camadas apresentam deformação elástica com o tráfego, nesse caso as cargas são transmitidas de forma equivalente entre elas. Distintivamente, nos pavimentos rígidos o revestimento detém uma rigidez superior em comparação às outras camadas, assim, absorve grande parte das tensões. No que se refere aos classificados como semi-rígido, a camada de base é cimentada com aglutinantes que possuem propriedades cimentícias, como exemplo cita-se uma estrutura onde o revestimento é constituído de asfalto e a base de solo cimento.

Diante disso, as cargas, o número de camadas e até o material do revestimento apresentam configurações distintas subordinadas ao tipo de pavimento. Através do esquema da Figura 4 pode-se perceber que no pavimento flexível o carregamento é transmitido de maneira mais pontual comparado ao outro e com parcelas aproximadas para as camadas

inferiores. No rígido, parte considerável das cargas é absorvida pelo revestimento e o excedente é distribuído por uma área maior em relação ao flexível.

Figura 4 – Distribuição de cargas num pavimento.

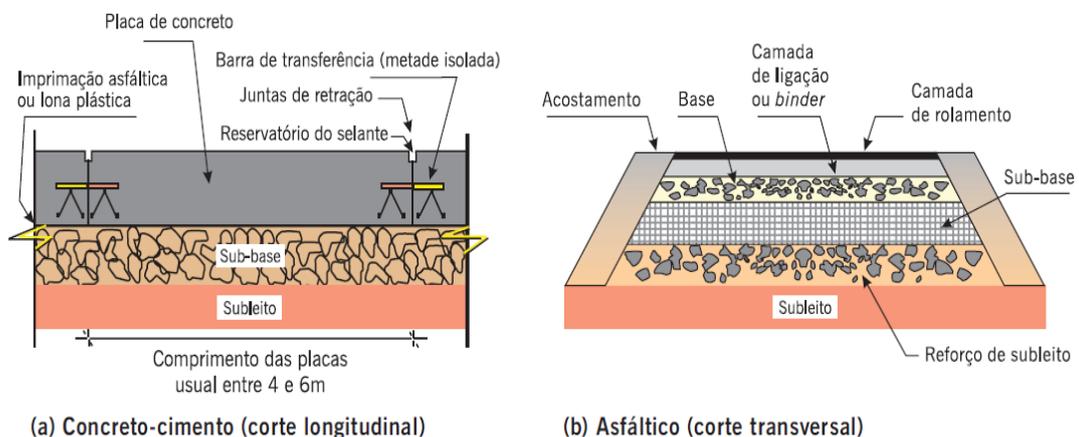


Fonte: Gunzi (2016).

Em função da disseminação das cargas, o pavimento flexível carece de maior quantidade de camadas com o intuito de reduzir seus efeitos para o subleito. Silva (2018, p. 15) destaca, ainda, que estes “[...] são separados e classificados em camadas para diminuir a espessura e, assim sendo, os gastos com a produção e seus agregados mais nobres e mais dispendiosos, dessa forma, sendo a camada de revestimento”.

Em contra partida o revestimento rígido dispõem de ampla capacidade estrutural, por isso o número de camadas é reduzido conforme observado na Figura 5 (a). Além do revestimento esse tipo de pavimento é sucedido pelas camadas de sub-base e subleito, enquanto que no pavimento flexível demonstrado na Figura 5 (b), ocorrem quatro camadas principais que podem ser modificadas em virtude do tráfego e dos materiais disponíveis, sendo elas: o revestimento ou camada de rolamento, base, sub-base, e reforço do subleito.

Figura 5 – Camadas básicas do pavimento.



(a) Concreto-cimento (corte longitudinal)

(b) Asfáltico (corte transversal)

Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

Na figura anterior é possível perceber, ainda, que o revestimento para cada tipo de estrutura difere. Schuh (2019, p. 22) explica que o revestimento do pavimento apontado como rígido é caracterizado:

[...] por uma placa de concreto de cimento Portland, onde que sua espessura é determinada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes, as mesmas podem ainda ser armadas ou não com barras de aço. Geralmente designa-se a subcamada desse pavimento como sub-base, pois a qualidade do material dessa camada é correspondente à sub-base de pavimentos asfálticos.

Determinado por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos, os revestimentos betuminosos são utilizados na camada de rolamento dos pavimentos flexíveis. Segundo a Petrobras (2015, p. 4), “o asfalto é um derivado de petróleo de elevada viscosidade, com propriedades impermeabilizantes e adesivas, não voláteis, de cor preta ou marrom”. Sua principal aplicação é na área da pavimentação, podendo ser utilizado como CAP, asfaltos diluídos, emulsões asfálticas e asfaltos modificados.

Sendo mais notável, o Cimento Asfáltico de Petróleo é apresentado como um material viscoso, com comportamento termoplástico e sólido ou semissólido a temperatura ambiente. O Segundo, anteriormente citado, é originado a partir da mistura do CAP com algum solvente que, com o fim da aplicação sobre a estrutura do pavimento, evapora. Quanto às emulsões o CAP encontra-se suspenso em água através de um emulsificante. Por fim, o asfalto modificado, como o nome sugere, trata-se de alterações com as adições de elementos a exemplo dos polímeros. Todos esses tipos formam as misturas asfálticas utilizadas na camada de revestimento do pavimento juntamente com os materiais granulares com distintas características e formas de aplicação.

Nitidamente é ampla a quantidade de rodovias e vias urbanas constituídas de pavimentos flexíveis diferentemente dos rígidos, que são bastante utilizados em rodovias. De acordo com Pereira (2010, p. 16), “no interior das cidades, o pavimento flexível tem muitas vezes uma vantagem em relação ao pavimento rígido, porque permite proceder mais facilmente a trabalhos de escavação e de reposição”.

Para Bernucci *et al.* (2006) é justificável o grande uso do asfalto em virtude de promover, dentre outros fatores, a união entre os agregados, permitir flexibilidade controlável, impermeabilização, durabilidade, resistência a ação de diversos ácidos, álcalis e sais, além de poder ser aplicado de variadas formas, seja quente ou emulsionado, com uma gama de materiais granulares, e com ou sem uso de aditivos.

Ademais, a aplicação do material asfáltico é rápida, sem a necessidade de um tempo de cura longo, que ajuda a manter o trânsito, sobretudo, em zonas urbanas. Por esses e outros fatores se tornou bastante utilizado em rodovias e no interior das cidades brasileiras. No entanto, o projeto de uma estrutura asfáltica deve ser concretizado pensando na efetivação de trajetos seguros aos usuários considerando as características locais e os aspectos econômicos.

Diante dos conceitos explanados “[...] o desafio de projetar um pavimento reside no fato de conceber uma obra de engenharia que cumpra todas as demandas estruturais e funcionais” (ZAGONEL, 2013, p. 25). Logo, deve-se atender as cargas requeridas pelo tráfego e conceder bom desempenho no que se refere ao conforto e segurança, para isso é essencial à obtenção e aprofundamento dos conhecimentos referentes à estrutura do pavimento e aos materiais que a compõem.

5.3 Funcionalidade de um pavimento

Simultaneamente a evolução das técnicas executivas da estrutura de um pavimento, a sociedade passou a expor novas exigências a serem acrescidas num projeto seja de uma via urbana ou rural, variável de acordo com as necessidades emergentes em cada ambiente.

É comum ao se tratar de pavimento que a capacidade de suporte seja considerada como fator mais importante para a atuação no transcorrer da vida útil, recebendo assim, maior destaque, no entanto, na atualidade, apenas uma estrutura que resista às cargas do tráfego não garante a qualidade de vida, segurança e bom desempenho. Em concordância Dresch (2016, p. 19) afirma que:

A melhoria da infraestrutura rodoviária é uma necessidade para a promoção da segurança e conforto do usuário. Normalmente, a grande preocupação ao projetar um pavimento esta voltada para a função estrutural e pouco se considera a sua parte funcional, embora esta seja cada vez mais importante para os usuários e pessoas que moram próximo as rodovias.

O Manual de Projeto e Práticas Operacionais para Segurança nas Rodovias do DNIT (2010) aponta que a segurança da rodovia é dada em função do grau de atendimento de alguns aspectos, dentre os quais estão: resistência à derrapagem e a degradação, não causar altos ruídos e desgastes excessivos aos pneus dos veículos, e promover a facilidade no escoamento das águas.

Com a intensa movimentação existente, as rodovias devem ser dotadas de condições apropriadas para a trafegabilidade durante todo o período que compreende o dia e a noite, até

mesmo em climas adversos. Para que isso ocorra é necessário haver elementos que minimizem os riscos de acidentes como a sinalização viária de qualidade, geometria compatível com a classe da via, drenagem de águas pluviais, boa visibilidade e aderência pneu-pavimento (FAGUNDES, 2020).

De modo a adicionar, Pereira (2010, p. 1) destaca que “a crescente preocupação com a qualidade de vida das populações, impõem que o Ambiente seja de importância fulcral, sendo assim, exige-se aos pavimentos rodoviários melhores qualidades funcionais incluindo o acústico”.

Considerando que a camada de rolamento é a superfície onde provem o contato direto entre o tráfego e as camadas estruturais, tem-se que a mesma deve ser projetada de modo a favorecer alguns aspectos. Conforme Queiroz (2016), a camada de revestimento da estrutura do pavimento necessita ser adaptada às condições de clima e tráfego especificados pelo ambiente local.

Assim, a funcionalidade de um pavimento está estreitamente ligada às características que adicionam melhorias no decorrer da longevidade da estrutura, a fim de garantir maior conforto e segurança ao usuário perante problemas frequentes a uma determinada localidade. De tal modo, o dimensionamento da estrutura rodoviária deve visar o melhor desempenho diante as solicitações do tráfego e atuação de agentes climáticos, sendo exigida, qualidade estrutural e funcional (FRANCISCO, 2009).

Algumas das características consideradas como funcionais a um pavimento são apontadas por Fagundes (2020, p. 7):

[...] a propiciação do conforto e da segurança ao usuário, a partir da garantia de boa condição de rugosidade superficial; do escoamento em tempo hábil, seja superficialmente seja por percolação, da água precipitada sobre a estrutura do pavimento, evitando fenômenos como: hidroplanagem e o efeito *spray*, o que contribui para a obtenção de adequada aderência ao conjunto pneu-pavimento, e; de resistência ao acúmulo progressivo de deformações irreversíveis, mais conhecidas como deformação permanente.

Conforme descreve Zagonel (2013), o Brasil é um país que, em termos de tecnologia, possui capacidade de utilizar pavimentos inteligentes que contribui no desenvolvimento tecnológico e proporciona ganhos imensuráveis no que diz respeito ao bem-estar, segurança e preservação de vidas, a partir do aprimoramento da capacidade funcional.

Dentre os benefícios que uma camada funcional do pavimento asfáltico agrega Fagundes (2020) frisa que atua na proteção das demais camadas as ações do intemperismo e

desgaste pelo tráfego, sendo assim, cumpre importante papel como artifício de manutenção econômica, em razão de sua fina espessura, colaborando para maior duração da estrutura.

No Brasil, apesar do transporte rodoviário ser extremamente importante para o desenvolvimento, suas vias requerem melhorias tanto nos aspectos estruturais quanto nos funcionais, principalmente em termos de segurança e acústica, sendo necessária a construção de pavimentos cada vez mais criteriosos e aprimorados (DRESCH, 2016).

Mediante o exposto, dentre o conjunto de fatores que podem ser resolvidos ou mitigados com a utilização do pavimento com características funcionais acentuadas, destacam-se as propriedades hidráulicas e acústicas, que reduzem os alagamentos em zonas urbanas derivadas, principalmente, da sobrecarga do sistema de drenagem, diminuem a hidroplanagem e absorve parte dos ruídos gerados com o tráfego que atrapalham a qualidade de vida daqueles que residem próximos a ruas, avenidas e rodovias. Nos tópicos a seguir é possível averiguar a abordagem de forma sucinta de cada um destes, bem como o desencadear dos problemas relacionados à segurança e à salubridade no tráfego.

5.3.1 Sobrecarga dos sistemas de drenagem e alagamentos

Derivada da instalação dos povos em lugares adeptos a sobrevivência, as cidades provocam transformações no meio natural a partir do desenvolvimento e crescimento contínuo, que abrange novas áreas com o passar dos anos. Apesar dos benefícios atrelados a esse processo, a urbanização acelerada e mal planejada expõe impactos negativos a população e a natureza.

De acordo com Pellizzari (2013), a urbanização provoca um acréscimo expressivo nas superfícies impermeabilizadas e no escoamento superficial, alterando o ciclo hidrológico natural da região e reduzindo o tempo de pico dos hidrogramas locais, o que resulta em frequentes alagamentos. Em concordância, Alencar (2013) destaca que a construção de pavimentos, edifícios e outras benfeitorias colaboram de maneira inevitável a impermeabilização.

Verifica-se que, junto ao acréscimo dessas áreas impermeabilizadas, a urbanização reduz à cobertura vegetal outrora existente, com isso a parcela de água pluvial que seria interceptada, infiltrada e evapotranspirada, passará a contribuir no escoamento superficial que compreenderá maior volume. Concomitantemente, o menor tempo de concentração irá provocar hidrogramas de cheias mais críticos (CASTRO, 2011).

Alencar (2013) pontua que os impactos gerados pela urbanização através da redução das áreas de infiltração e aumento do escoamento das águas pluviais superficiais são dados de três maneiras distintas:

- 1º A partir da redução na vida útil do sistema de drenagem: com o volume superior de sólidos transportados e sedimentados no interior das tubulações ocorre a redução, em longo prazo, do diâmetro, carecendo, desse modo, de intervenções onerosas.
- 2º Prejuízos nas recargas dos aquíferos: em função da existência de pequenas áreas de contato entre a água e o solo, além da drenagem rápida que reduz a infiltração de importantes parcelas pluviais.
- 3º Ocorrência de enchentes em virtude da falta de planejamento urbano e da impermeabilização do solo, desencadeando prejuízos financeiros ao governo e a população, que passa a ter contato com águas que transportam poluentes, resíduos e contaminantes existentes nas ruas.

Assim, conseqüentemente o acúmulo de água nos meios urbanos é crescente com os períodos chuvosos, ao passo que as áreas permeáveis são reduzidas de forma gradual. Somados aos problemas citados anteriormente, Furtado (2017) enfatiza que o impulsionamento se dá em função de uma drenagem insuficiente ou até mesmo com o lixo acumulado nas bocas de lobo que dificulta o direcionamento das águas, assim, a proliferação de doenças de veiculação hídricas como o sarampo e a leptospirose podem advir em decorrência.

Além disso, “a falta de drenagem é um agravante a mobilidade, a áreas de alagamentos e deslizamentos de terra, é agente facilitador de enchentes e da proliferação de doenças de veículo hídrico o que possibilita a contaminação de corpos d’água [...]” (GOUVEIA, 2019, p. 14).

Com isso, notícias corriqueiras de pontos, ruas e até bairros alagados são estampadas nas manchetes dos jornais brasileiros, sendo perceptíveis vários episódios de problemas provenientes da drenagem pluvial ineficiente, principalmente, no cotidiano dos grandes centros urbanos. A seguir, a Figura 6 expõem alagamentos que aconteceram em cidades localizadas em diferentes regiões do Brasil durante um período de precipitação.

Figura 6 - Notícias de alagamento em cidades brasileiras.



Fonte: Copilado de Farias (2021), UOL (2021) e G1 (2021).

Os casos, apresentados pela mídia, descrevem alagamentos registrados no dia 18 de março de 2021 em Joinville (SC), João Pessoa (PB) e São Paulo (SP). Sendo pertinente observar que transtornos resultantes de casos semelhantes ou mais intensos contribuem desde riscos a saúde pública, acidentes relacionados à aquaplanagem e impedimento da mobilidade urbana, a perdas de imóveis, automóveis e até mesmo de vidas. Destaca-se ainda, que em algumas localidades uma chuva de pequena amplitude é suficiente para a formação da lâmina d'água, graças às poucas áreas permeáveis existentes.

Diante dessa problemática surgiu à necessidade da execução de uma drenagem com atuação eficiente para a redução dos frequentes alagamentos, sendo a solução compreendida na instalação de canalizações que encaminham os escoamentos da montante a jusante, transferindo, assim, o problema de local (PELLIZZARI, 2013).

Castro (2011) externa também sobre a falta de cuidados com a qualidade das águas captadas e lançadas diretamente nos corpos hídricos pelos usuais sistemas de drenagem brasileiros. Desse modo, os corpos d' água são receptores das substâncias presentes nas ruas e calçadas das cidades que pode apresentar contaminantes e sedimentos.

“Diante desses problemas, surgiram novas abordagens no tema de manejo de águas pluviais. As novas abordagens se baseiam em técnicas de retenção e infiltração, reduzindo a probabilidade de inundações” (SILVA, 2019, p. 16). Assim, os chamados sistemas compensatórios funcionam com a intenção de recriar uma situação semelhante a natural, onde as águas infiltram por meio de estruturas permeáveis. Castro (2011, p. 9) esclarece, ainda, que:

Estas técnicas visam compensar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos. Esse tipo de drenagem tem inúmeras vantagens em relação ao preceito tradicional. As vantagens irão depender da maneira como cada estrutura compensatória está inserida no meio ambiente urbano. Como são técnicas que visam a infiltração das águas pluviais, além de contribuir para a redução dos volumes escoados, elas favorecem a recarga das águas subterrâneas. O uso de técnicas de infiltração pode ficar prejudicando em áreas onde o solo não possui uma boa capacidade de infiltração e em locais onde o lençol freático esteja em profundidade pequena em relação à estrutura.

Segundo Silva (2019) a abordagem que utiliza estruturas de infiltração como solução colabora para a redução do volume escoado, amortizando a ocorrência de alagamentos. Ainda de acordo com o mesmo, apesar de o pavimento solicitar o máximo de impermeabilidade a fim de não advir à diminuição da capacidade de carga do solo, tal característica se torna um problema nos grandes centros urbanos com a intensificação do escoamento superficial que promove os alagamentos. Desse modo, a ideia dos pavimentos permeáveis surge como uma maneira de restaurar as condições aproximadas que o solo detinha antes da superfície pavimentada.

5.3.2 Situações adversas: hidroplanagem ou aquaplanagem

Conforme exposto, as vias pavimentadas oferecem inúmeros benefícios ao meio social devido ao melhor desempenho na movimentação de cargas e pessoas. Para Bernucci *et al.* (2006) o principal objetivo associado à pavimentação está na capacidade de garantir o tráfego durante todo o ano sobre as diversas condições climáticas e proporcionar ao usuário conforto e segurança no rolamento.

Predominantemente tropical, as chuvas de grande intensidade fazem parte do clima brasileiro que, em conjunto com as áreas impermeáveis, colabora para a formação de pontos alagados. Ao longo do pavimento o acúmulo de água é algo bastante indesejado por prejudicar o desempenho da via e afetar diretamente a segurança do tráfego.

Em suma, tem-se que a segurança de um pavimento envolve vários fatores que vão desde a sinalização e o comportamento humano, aos aspectos do pavimento. Desse último pode-se destacar a geometria, a irregularidade superficial e o atrito pneu-pavimento que quantifica a aderência entre as duas superfícies, sendo fundamental na resistência a derrapagem em dias chuvosos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Tais fatores comprometem o vínculo entre o pneu e o pavimento durante o deslocamento, e conseqüentemente a segurança dos indivíduos situados no interior e próximo ao veículo. Essa perda da aderência entre as superfícies é uma das principais causas que contribui para o fenômeno que provoca derrapagens de automóveis durante períodos de precipitação.

Denominado de hidroplanagem ou aquaplanagem a situação é caracterizada pela perda de contato pneu-pavimento ao transitar sobre a superfície coberta com uma fina camada hídrica. Tal condição faz com que o condutor, em determinadas circunstâncias, deixe de ter o controle da direção e o veículo deslize sobre a via (JUNIOR, 2009).

Diante das suas características, a hidroplanagem ocasiona acidentes que podem ser fatais, necessitando, pois, de maior observação no atendimento da aderência existente entre o pneu e o pavimento por se tratar de um fator determinante para o evento. Conforme Junior (2009, p. 31):

As premissas necessárias para que se processe uma hidroplanagem dão naturalmente a noção dos riscos inerentes à incidência deste tipo de evento, pois tem-se que velocidade significativa, e incapacidade de controle do veículo pelo condutor, o que pode provocar acidentes de proporções diversas, configurando-se potencialmente desde uma saída de pista sem danos até um evento com vários óbitos.

Junior (2009) destaca, ainda, que as variações das características da pista colaboram para a formação das condições que culminam nesse evento, bastando o acesso a uma superfície côncava com o acúmulo de água ou a transferência de um trecho reto a uma curva onde mesmo diante baixas velocidades o fenômeno acontece.

Apontada como a principal causa da aquaplanagem, a formação da película de água entre os pneus e a superfície do pavimento é ocasionada de acordo com o Manual de Projeto e Práticas Operacionais para Segurança nas Rodovias do DNIT (2010, p. 117):

[...] por uma drenagem imprópria entre a superfície e os pneus, resultante da falta de uma textura de superfície, de seção transversal imprópria (falta de coroamento, sulcos deixados pelas rodas etc.) e/ou corrugação inadequada dos pneus. A formação da película de água apresenta pouco efeito, a velocidades baixas. Contudo, à medida que a velocidade aumenta, a película de água reduz o contato entre os pneus e o pavimento, resultando numa diminuição na resistência à derrapagem e a uma possível aquaplanagem.

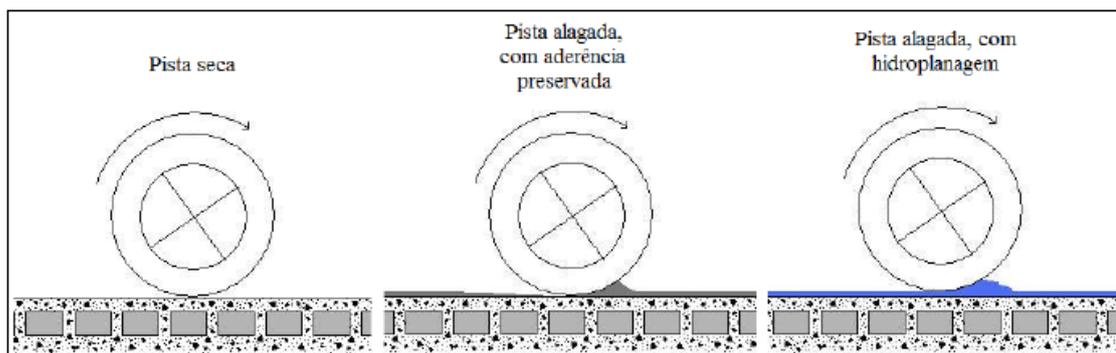
Em concordância Francisco (2009, p. 5) revela que “uma superfície com fracas características de drenagem contribui para a ocorrência de acidentes resultantes do fenômeno de hidroplanagem, perda de visibilidade e aparecimento de inúmeras patologias”.

Dentre outras causas que induzem o acúmulo de água nas superfícies pavimentadas tem-se: a falta de manutenção e alterações de características aos arredores da rodovia. Segundo Junior (2009), esses acontecimentos comprometem a ação dos dispositivos de drenagem pluvial fazendo com que a lâmina de água se concentre mesmo perante chuvas de pequena intensidade.

É importante evidenciar que a drenagem das pistas de rolagem não se dá apenas pelo fenômeno da hidroplagem, e sim com o intuito de permiti-las trafegáveis. No entanto, apesar da instalação dos dispositivos pode ocorrer o acúmulo de água após precipitações de intensidade maiores (JUNIOR, 2009).

Diante do exposto, a passagem do veículo sobre a superfície com água ocorre da seguinte forma: ao percorrer o trecho com superfície molhada o automóvel tende a retirar o líquido do estado inicial de repouso, assim parte dele incide nos sulcos da banda de rodagem do pneu enquanto o restante é direcionado a área externa da trilha percorrida, tal acontecimento é perceptível através do rastro seco deixado com a passagem que evidencia a aderência do pneu ao pavimento, diferentemente do que ocorre com a hidroplanagem (JUNIOR, 2009).

Na Figura 7, visualiza-se o contato pneu-pavimento no caso da pista seca, pista alagada com aderência preservada e com a perda da aderência que finaliza a hidroplanagem.

Figura 7 - Representação da hidroplanagem.

Fonte: Junior, 2009.

Quando a pista está seca o contato pneu-pavimento acontece sem que haja um obstáculo entre as superfícies, no entanto a presença de água cria uma barreira para a efetivação da relação do pneu com o revestimento do pavimento. No segundo caso, a aderência é assegurada mesmo com a presença de água, caracterizando o caso descrito anteriormente. Por último, o pneu está sobre o líquido, resultando na perda de aderência e concretização da hidroplanagem.

Francisco (2009) complementa que o atrito, força que se contrapõem ao movimento, decorrente numa pista molhada é inferior à pista seca, sendo a diferença ligada ao comparecimento da fina película de água na superfície. Com o acréscimo da velocidade o tempo de contato pneu-pavimento reduz juntamente com o tempo que processa a expulsão da água, portanto diminuindo o atrito. Isso faz com que ocorra a aquaplanagem, advinda da perda do contato do pneu com o pavimento pela permanência de um filme de água não rompido pelos pneus, que conforme explica o mesmo autor, deixa de rolar e passa a flutuar e escorregar sobre a superfície.

Segundo explicita o Manual de Projeto e Práticas Operacionais para Segurança nas Rodovias do DNIT (2010), o controle na parada do veículo acontece a partir da pequena área de interação dos pneus com o pavimento. Quando a superfície encontra-se seca o atrito opera adequadamente e garante a segurança dos automóveis, contudo basta 0,02 mm de água para incidir à redução de 75% desse fator. De tal modo, DNIT (2010, p. 40) conclui que “os pavimentos devem ser projetados e conservados, de modo que permitam o fluxo de água para fora da sua superfície e que mantenham coeficiente de atrito adequado durante sua vida útil”.

Ainda de acordo com o Manual de Projeto precedente, pesquisas efetivadas nos Estados Unidos apontam que 20% dos acidentes e 14% dos acidentes fatais é consequência de pavimentos molhados, sendo mais perigosa a direção noturna.

Segundo dados do Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária (2017), no período que compreende os anos de 2010 a 2017, um total de 4,7% dos acidentes brasileiros foram causados pela existência de pista escorregadia. No mesmo período de registros o anuário aponta que 2,5% das vítimas fatais incidiram em função do mesmo problema. Já o painel CNT de Consultas Dinâmicas dos Acidentes Rodoviários (2020) concluiu que 15,7 % dos acidentes e 12,8% das mortes se deu por saída de pista. Importante frisar que esses estudos não revelam qual a porcentagem real para os casos de aquaplanagem, podendo estar inseridos acidentes que envolvam outros fatores.

Diante disso, podem-se verificar algumas manchetes envolvendo casos de hidroplanagem apresentadas através da Figura 8. Acidentes como estes podem proceder desde ferimentos leves a morte de condutores, passageiros e pessoas próximas às vias de tráfego.

Figura 8 - Acidentes em decorrência de Hidroplanagem.

The image shows two screenshots of news articles. The top screenshot is from ClickPB, titled "Caminhão sai da pista e carro capota em dia de chuva com pelo menos quatro acidentes por aquaplanagem na BR-101". The bottom screenshot is from G1, titled "Aquaplanagem causa acidente com dois feridos na Rodovia Assis Chateaubriand, dizem bombeiros".

Fonte: Copilado de ClickPB (2020) e Bonfim (2020).

Perante o apresentado, a aderência proveniente da textura e do atrito resultante da relação do pneu com o pavimento desempenha importante papel no que diz respeito à segurança das vias e rodovias, apresentando redução na distância de frenagem e mantendo o veículo na trajetória desejada pelo motorista (ARAÚJO, 2009).

Echeverria (2011) pontua que as condições ambientais como as chuvas e o excesso de umidade influenciam expressivamente no atrito desenvolvido na interação pneu-pavimento. Em decorrência desses fatores a “manutenção do contato entre as superfícies é

essencial, para evitar esse fenômeno. É por este contato que se pode garantir o atrito [...]” (ARAÚJO, 2009, p. 27).

Sabendo das diversas contribuições para a ocorrência da aquaplanagem, Bernucci *et al.* (2006, p. 429) complementa que:

Vários fatores colaboram para a aderência pneu-pavimento em pistas molhadas, mas dois são essenciais: a textura superficial da pista e características dos pneus (ranhuras, pressão de inflação, dimensões e tipo). A habilidade do motorista, a geometria da via e as condições gerais do veículo como amortecedores, freios etc., contribuem para evitar acidentes. A segurança em pistas molhadas pode ser considerada como um dos aspectos funcionais de um pavimento, muito embora haja pouca tradição no país de sua avaliação ou medida em rodovias, sendo mais usual em aeroportos.

Apesar de tudo, é preciso enfatizar que mesmo sendo necessária a adoção de medidas mitigadoras para reduzir a ocorrência desse fenômeno é notória a priorização por pavimentos mais baratos evidenciados pelas regras licitatórias do país, sendo comum encontrar pistas com manutenção deficiente e precariedade de novos empreendimentos, quando deveria se buscar o cumprimento das normas técnicas e do melhor desempenho funcional das rodovias com o intuito de prevenir problemas como a hidroplanagem (JUNIOR, 2009).

5.3.3 Geração e propagação de ruídos

Mediante a grande concentração de pessoas e de veículos, o ambiente urbano tornou-se cada vez mais caótico com o perpassar dos anos. As grandes cidades, sinônimas de desenvolvimento, ofertam um tráfego intenso que coopera na poluição sonora e ambiental, culminando numa qualidade de vida debilitada e alvo de constantes inquietações ao redor do mundo. Em conformidade Alves (2019) declara que de maneira simultânea as cidades são o núcleo do desenvolvimento e da produção de resíduos, poluição e de variados problemas que perturba a natureza.

Com a crescente preocupação na preservação do meio ambiente e do bem estar, assuntos como a geração de ruídos são levantados em discursões com o intuito de buscar soluções viáveis e eficazes na melhoria da vida urbana. De acordo com Leski (2012), o confronto dos problemas que afetam negativamente a qualidade de vida é exigido pela sociedade ecologicamente consciente. Assim, diante a ocorrência de índices relevantes de poluição sonora, existe a necessidade de maior abordagem do assunto. A respeito, Leski (2012, p. 6) informa:

O aumento do nível sonoro, tanto no ambiente urbano como no rural tem sido uma preocupação mundial e vem alarmando as cidades brasileiras nos últimos tempos. O grande aumento do volume de tráfego de veículos, devido à densidade demográfica, e peculiarmente no Brasil e países emergente, com o crescimento da economia, como facilidades na aquisição de veículos, aumento no transportes de bens e serviços e também do turismo; são fatores determinantes no crescimento dos índices de poluição sonora no ambiente urbano e rural. Na busca pela qualidade ambiental, combate-se a emissão de gases e a geração de ruído de tráfego como causadores de danos irreversíveis ao meio ambiente, por isso têm sido alvo de inúmeros estudos e pesquisas.

Em concordância, Bernucci *et al.* (2006) ratifica que é crescente no mundo a preocupação quanto aos problemas que afetam o meio ambiente e a qualidade de vida das pessoas, sendo um deles o excesso de ruídos proveniente, em parte, pelo trânsito de veículos, em função disso, o pavimento acaba por colaborar na geração e propagação o que o fez ser alvo de estudos com a finalidade de projetar misturas asfálticas focadas nesse quesito.

Dessa forma, tem-se que o ruído é designado como um tipo de poluição ambiental que acarreta problemas de saúde, impactando economicamente e financeiramente a vida das pessoas ao redor do mundo, assim sendo, a medição dos níveis em locais próximos as rodovias é essencial devido à contribuição dada pelo tráfego de veículos (DRESCH, 2016).

Em síntese, a onda sonora detectável pelo ouvido humano é oriunda da variação de pressão produzida por vibrações transmitidas pelo ar, que resulta na exibição de uma sensação agradável ou desagradável a audição. A assimilação do som pelo aparelho auditivo humano é complexa e condicionada aos fatores como a fisiologia, a capacidade de processamento da informação pelo cérebro, o retorno à sensação imposta, o ambiente inserido e o meio que gera e propaga o som, com isso, parâmetros físicos são responsáveis pela determinação de escalas que funcionam como indicadores dos níveis de ruídos (PEREIRA, 2010).

Diferente do som a classificação do ruído acontece de modo subjetivo e variável a partir de uma emissão sonora desagradável ao ouvinte, no entanto o termo é reconhecido apenas quando a interpretação do som afeta a saúde tanto fisiológica quanto psicológica da população atingida pela sua propagação (ALVES, 2019).

Diante a percepção da emissão de ruídos ocasionados pelo contato da superfície de alguns pavimentos com os pneumáticos dos veículos, pesquisas foram sendo realizadas para maior entendimento do problema. Tais estudos apontam que a textura superficial do revestimento possui influência na produção de sons desagradáveis, como também a velocidade, o tipo da mistura asfáltica, a existência de água durante o contato, dentre outros fatores (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Embora o ruído rodoviário seja um tanto considerável, sobretudo, aos que residem próximo as vias, é necessário ressaltar que existem vários meios pelos quais o ruído pode ser originado e propagado. Alarmes e buzinas de automóveis, aparelhos de som, equipamentos da construção civil, movimentos religiosos, festas e shows em lugares públicos, passagem de aviões e helicópteros, propagandas em carros de som e, até mesmo, gritos e vozes de pessoas são exemplos corriqueiros de ocasionadores de ruídos existentes nas pequenas e grandes cidades. Mesmo perante as numerosas causas, Alves (2019) afirma que geralmente o maior contribuinte, se comparado ao total, é o ruído produzido pelo tráfego.

Em consequência a exposição recorrente a poluição sonora, têm-se a procedência de diversos problemas. Ribas, Schmid e Ronconi (2010) informam que a exposição desencadeia problemas auditivos, como zumbidos e perda da função auditiva, outros efeitos na saúde tidos como acumulativos ou secundários e terciários podem advir, a exemplo do estresse, infarto e risco a hipertensão, além dos efeitos determinados como sendo socioculturais e econômicos exemplificados pelos autores com o isolamento social, redução do valor dos imóveis e a qualidade acústica na vizinhança.

Júnior (2017) esclarece, ainda, que apesar dos veículos modernos terem um sistema de isolamento mais eficiente, ainda ocorre transmissão de ruído para os passageiros e condutores. Neste último, o autor evidencia que os efeitos são mais perigosos já que pode contribuir na ocorrência de acidentes de trânsito, colocando a vida de diversas pessoas em risco devido à perda da capacidade motora e mental e do aumento de estresse.

Sabe-se que o ruído resultante do trânsito é composto pelo somatório dos efeitos sonoros provenientes do motor e do sistema de escape, predominante para velocidades menores, e da interação pneu-pavimento, enfatizado para velocidades maiores que 40 km/h (ALVES, 2019).

Em vista disso alguns países tidos como desenvolvidos abordam o assunto de forma prioritária na escolha da camada de revestimento do pavimento, especialmente em regiões residenciais. Para Knabben (2017) a velocidade cujo fator predominante advém da interação pneu-pavimento é 50 km/h. Contudo, o autor considera que essa relação será o principal motivo na geração do ruído para qualquer velocidade com a futura substituição dos veículos comuns pelos elétricos, resultando, assim, na procura por medidas que atenuem a geração e propagação do ruído, seja através de avanços tecnológicos dos pneus automobilísticos ou de revestimentos asfálticos que reduzam sua ocorrência.

Percebendo a influência do tipo do veículo e da velocidade, Júnior (2017) acrescenta que os níveis de ruídos também são maiores em situações de subida íngreme e de passagem

de veículos pesados, assim como em locais onde a velocidade média é maior, em comparação aos trechos de declive ou de tráfego restrito para veículos menores a pequenas velocidades.

Em suma, a contribuição dada pela interação do pneu com a camada pavimentada ocorre a partir de várias características associadas ao veículo, as condições climáticas e ao próprio revestimento. Knabben (2017) apresenta como influenciadores a porosidade, granulometria, idade, textura e rigidez do pavimento, temperatura e ocorrência de chuva, além do modelo, velocidade e pneus do veículo. Já Leski (2012) acrescenta como alguns fatores o peso por eixo, idade do veículo, pressão de inflação, material e composição pneus.

Diante disso, Knabben (2017) separa o ruído do contato pneu-pavimento em duas parcelas, a oriunda do ruído mecânico e a do ruído aerodinâmico. A primeira é associada à textura da camada de revestimento, enquanto que a outra é relacionada à porosidade do mesmo. Portanto, a redução do ruído gerado acaba por depender das melhorias adicionadas ao revestimento no que se refere à textura e a porosidade.

Em seu trabalho Knabben (2017) afirma, também, que infelizmente o Brasil não conta com uma legislação com foco na redução do ruído originado com o tráfego, nem de níveis de pressão sonora das rodovias. Desse modo, ao longo do território brasileiro pouco se tem dado importância aos níveis de ruídos.

De acordo com o noticiado pela UOL (2018), a OMS, por meio de um relatório referente à poluição sonora, aborda que os níveis de ruídos recomendados para o trânsito é de, no máximo, 53 decibéis no decorrer do dia e de 45 no período noturno. Nunes (1999) resume, por meio da Tabela 1, os níveis de ruído em algumas cidades ao redor do mundo na década de 1990.

Tabela 1 – Nível de Pressão Sonora medidos em diferentes cidades.

Países	Cidades	Data	Níveis de Pressão Sonora Medidos
Espanha	Madrid, Barcelona e Valência	1991	acima de 70 <i>dB(A)</i>
	Terrassa	1998	entre 60 e 75 <i>dB(A)</i>
Índia	Calcutá	1997	entre 81,3 e 91,1 <i>dB(A)</i>
Argentina	La Plata	1998	entre 68,60 e 78,90 <i>dB(A)</i>
Polônia	Cracóvia	1995	entre 54 e 65 <i>dB(A)</i>
Brasil	Rio de Janeiro (Copacabana)/RJ	1991	entre 72 e 82,5 <i>dB(A)</i>
	Belo Horizonte/MG	1997	entre 71,7 e 85,5 <i>dB(A)</i>
	Porto Alegre/RS	1995-96	entre 57,6 e 82,6 <i>dB(A)</i>
	Santa Maria/RS	1998	entre 68,9 e 80,2 <i>dB(A)</i>

Fonte: Nunes, 1999.

Mediante o abordado, a mitigação dos ruídos pode advir através da atuação direta na fonte de geração sonora, nos receptores do efeito ou no percurso de propagação das ondas. No primeiro caso, a fonte causadora passaria por melhorias com o intuito de reduzir a produção de sons desagradáveis. No seguinte, os locais receptores sofreriam ajustes, como é o caso de edifícios com isolamento nas fachadas. Por último, as soluções seriam adicionadas no caminho de propagação do ruído, a exemplo da instalação de barreiras acústicas nas rodovias (PEREIRA, 2010).

Dentre as medidas minimizadoras do efeito é possível destacar o emprego de pavimentos que reduz a propagação do ruído a partir da absorção das ondas. Quanto a essa técnica Bernucci *et al.* (2006) destaca as vantagens econômicas proporcionadas ao poder público, pois diminui gastos direcionados a efetivação de isolamentos nas edificações, a exemplo de hospitais e repartições públicas, e contribui para o menor gasto energético pela possibilidade de utilização das janelas abertas mesmo em edificações próximas aos viadutos.

Infelizmente o planejamento das ações urbanas a fim de solucionar os incômodos provenientes de fontes sonoras desagradáveis no Brasil é escasso. Medidas como a utilização de pavimentos denominados silenciosos, instalação de barreiras acústicas e realização de mapeamento sonoro encontram-se, geralmente, restritos aos trabalhos desenvolvidos de maneira acadêmica (ALVES, 2019). Enquanto isso, os grandes centros urbanos continuam sendo favoráveis a problemas de saúde e ao crescente desconforto que coopera na redução da qualidade de vida.

5.4 Pavimento permeável

Conforme o ponto de vista do tópico anterior, o surgimento e crescimento dos centros urbanos acabaram por favorecer problemas associados à incidência de ruídos e acúmulo de água nas vias de tráfego, contribuindo, de maneira negativa, na qualidade de vida e segurança das pessoas.

Em concordância, Santos (2018) reafirma a respeito do enfrentamento de adversidades como as cheias, ocorridas em zonas urbanas nos períodos chuvosos, devido à impermeabilização do solo. Por sua vez, German-González e Santillán (2006) enfatizam que o ruído é um dos maiores inconvenientes ambientais, considerado como estudo prioritário nas organizações internacionais, por comprometer negativamente a população com efeitos físicos e psicológicos.

Perante os impactos provenientes do excesso de escoamento superficial, a drenagem urbana clássica ou convencional tem como característica o direcionamento rápido das águas para a jusante através de canalizações que colaboram na redução dos picos de cheias. Entretanto, tal conduta é criticada por alguns especialistas, pois a transferência do volume precipitado é responsável por sobrecarregar os córregos receptores (MOTTA 2019).

Em vista disso, soluções retardadoras do efeito da urbanização descontrolada que pouco comprometa o estado natural dos corpos d'água passaram a ser solicitadas. Segundo Virgiliis (2009), novas medidas foram concebidas em países da Europa e América do Norte a partir da década de 1970, a fim de resolver os problemas relativos às enchentes. Para Motta (2019, p. 17), “tais medidas importam em planejamento integrado da bacia de drenagem, chegando a soluções abrangentes no espaço e no tempo, evitando medidas de caráter restrito, que apenas deslocam os problemas para jusante”.

Dispostas como tecnologias alternativas ou compensatórias, esses artifícios de drenagem urbana procuram amortecer as mudanças, impostas pela urbanização, nos processos hidrológicos, reestabelecendo a qualidade de vida juntamente a conservação ambiental (VIRGILIIS, 2009).

Em contraposição ao sistema clássico, o alternativo resiste ao escoamento a partir da infiltração hídrica que colabora na ocorrência de menores volumes superficiais e na recarga das águas subterrâneas (MOTTA, 2019). Assim, além de contribuir na redução de áreas alagadas, a técnica compensatória atua, em parte, na continuidade do ciclo hidrológico. De forma sucinta, Guedes (2015, p. 15) descreve:

Os sistemas de drenagem alternativos procuram imitar o ciclo hidrológico natural e reduzir os problemas relacionados à impermeabilização do solo. Ao contrário da drenagem convencional, seu princípio baseia-se na diminuição da vazão e do volume de escoamento na fonte [...].

Visando o máximo de contribuições no controle do deflúvio superficial, os sistemas, convencional e alternativo, são utilizados simultaneamente, de modo que esse auxilia o primitivo na obtenção de respostas aprimoradas na esquematização e estratégia da drenagem urbana.

Motta (2019) aponta que de maneira mais ampla, as estratégias podem ser classificadas como medidas de controle estruturais e não estruturais. Sendo a primeira advinda da modificação do meio a partir de obras de engenharia, enquanto a outra busca soluções mediante leis e regulamentos. Ainda de acordo com o mesmo, as estruturais são distinguidas,

também, conforme o desempenho na bacia hidrográfica em medidas de controle centralizado ou controle à jusante, para aquelas de grande porte que têm como característica o armazenamento rápido ou por períodos consideráveis, e medidas de controle na fonte ou distribuídas, que considera os dispositivos de infiltração e armazenagem da água cujo controle é realizado na fonte que colabora com o escoamento superficial.

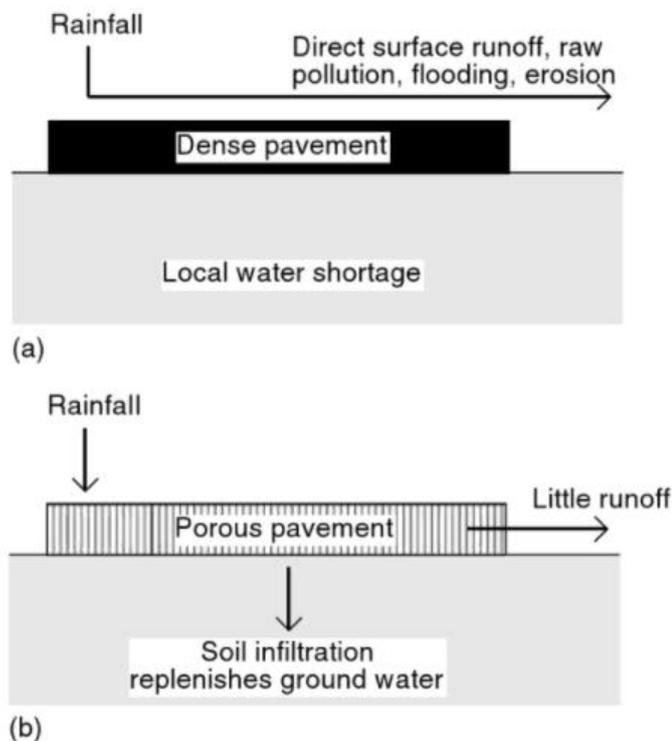
Dentre as medidas que propõem a ação diretamente na fonte, Motta (2019) cita: trincheiras drenantes, valas de infiltração, poços de infiltração, telhados armazenadores, microrreservatórios e pavimentos permeáveis. O último, enfatizado a seguir, ao ser implantado coopera na redução do escoamento superficial em locais que o solo foi impermeabilizado com o processo da urbanização (PELLIZZARI, 2013).

Analogamente ao dissertado em “Caracterização e estrutura de um pavimento”, Virgiliis (2009) retrata que a concepção do pavimento abrange a ideia da não interferência de água na preservação da capacidade mecânica e do comportamento das camadas, em virtude da umidade do solo que contribui, dentre outros, para o surgimento de patologias como trincas e panelas.

Contrariando essa premissa, o pavimento permeável permite o acometimento de água por entre suas camadas reduzindo o deflúvio superficial que assola a população das cidades em dias chuvosos. Alencar (2013) alega que a estrutura é denotada como uma alternativa não convencional que, através da infiltração, atenua as implicações oriundas da impermeabilização, cooperando no ganho ambiental.

Através de o esquema a seguir mostrado na Figura 9, pode-se entender que a precipitação advinda sobre um pavimento denso ou impermeável é totalmente escoada para a jusante, de tal modo que o solo sob o pavimento permanece seco, uma vez que a água não consegue infiltrar no meio. Entretanto, a utilização do pavimento com capacidade permeável além de contribuir para a redução do escoamento superficial, com a absorção de parte da chuva, reabastece as águas subterrâneas.

Figura 9 - Hidrologia de um pavimento impermeável (a) e permeável (b).

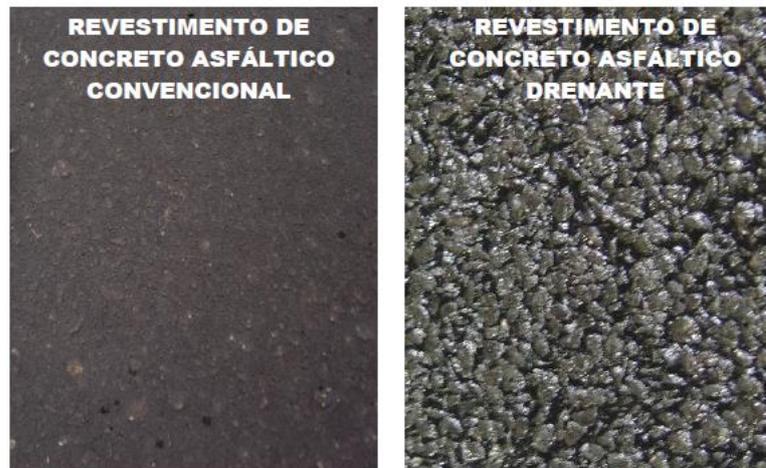


Fonte: Ferguson (2005).

Segundo Antunes (2017, p. 28) “a água infiltrada é armazenada temporariamente antes da sua utilização, infiltração no solo, ou descarga controlada à jusante”. Para Virgiliis (2009) trata-se de um pavimento com elevada porosidade e permeabilidade, desse modo os não detentores de teores de vazios abundantes em conjunto com a capacidade de infiltração é desconsiderado permeável.

Por fim, Tenreiro (2016) complementa quanto à variedade de materiais que podem constituir a camada superficial, a exemplo, dentre outros, da mistura betuminosa drenante representada na Figura 10. Nela tem-se que a mistura asfáltica drenante aparenta teor de vazio superior em comparação ao asfalto convencional, tal fator é perceptível apenas com a análise da imagem, e colabora na infiltração do deflúvio superficial, sendo possível, conforme estudos desenvolvidos ao longo dos anos, permitir a absorção dos sons indesejáveis provenientes do tráfego de veículos.

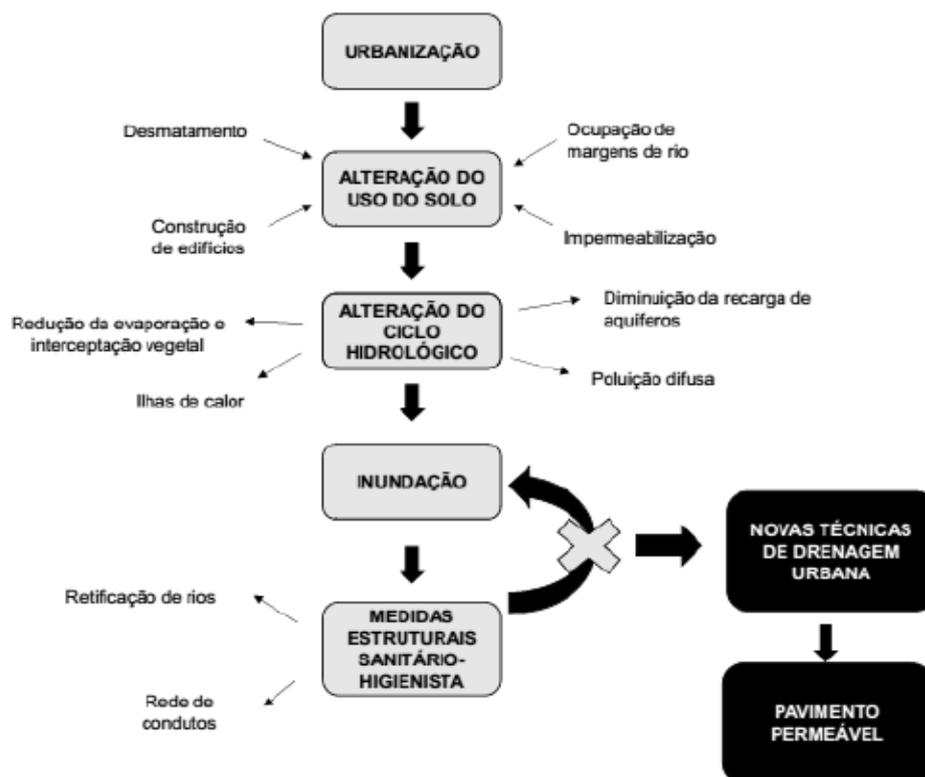
Figura 10 - Superfície de um revestimento de concreto asfáltico convencional e drenante.



Fonte: Dumke (2005).

De maneira sucinta, o esquema da Figura 11 seguinte aborda alguns dos aspectos descritos pelo tópico em questão, considerando a urbanização e alterações no ciclo hidrológico natural mitigado com a implantação das novas técnicas compensatórias de drenagem urbana a partir da implantação do pavimento permeável.

Figura 11 - Diagrama esquemático.



Fonte: Antunes (2017).

Na esquematização tem-se ainda que a alteração do uso e ocupação do solo é advinda da impermeabilização e construção de edifícios, como também, do desmatamento e da ocupação das margens dos rios. Em conjunto, colaboram para a redução da infiltração de água no solo, interceptação vegetal e evaporação, aumentando o escoamento superficial que resulta em alagamentos. Além do mais, as instalações próximas aos rios culminam desastres causados pelos períodos de cheias com o aumento do nível das águas. Assim, ocorre a alteração do ciclo hidrológico que pode ser reduzido com o uso das medidas compensatórias estruturais tais como o pavimento permeável.

5.4.1 Primeiros estudos e aplicações

Desde sua origem e aplicabilidade, o pavimento permeável é motivo de estudos por diversos países, principalmente, da Europa, Ásia e América do Norte, com o intuito do melhor desempenho funcional, agregando conforto e segurança ao usuário, e estrutural, para que seja utilizado em rodovias com solicitações de carga maiores.

Considerada pioneira, a França aplicou a estrutura porosa no final da década de 40. Apesar disso, não foram alcançados bons resultados já que o betume empregado na época não garantia firmeza necessária perante os altos índices de vazios (AZZOUT *et al.*, 1994 apud ACIOLI, 2005).

De acordo com Machado (2007), na década de 30, os Estados Unidos havia começado a realizar experimentos, contudo resultados satisfatórios foram adquiridos somente a partir da década de 50 com pavimentos de dois cm de espessura que consistia num tratamento superficial antiderrapante com 6 a 7% de betume na sua composição. Tais estudos tiveram início devido à preocupação quanto à segurança do tráfego sobre as superfícies molhadas que, conforme abordado, contribui para a incidência da aquaplanagem.

Com a chegada dos anos 60, as misturas asfálticas compostas por agregados de distribuição aberta na curva granulométrica, que equivale aos índices de vazios consideráveis, passaram a ser aplicadas sobre camadas asfálticas existentes. Por consequência, a capacidade de drenagem em função dos vazios comunicantes passou a diminuir a presença da lâmina de água sobre o pavimento, enquanto que a capacidade de absorção do ar comprimido pelos pneus amortiza a propagação de ruídos (DUMKE, 2005).

Doravante os anos 70, testes executados no Japão e em países da Europa e África do Sul tinham como objetivo analisar revestimentos mais espessos (4 cm) com 4 a 5% de betume que pudessem drenar e retirar a água superficial sobre a estrutura. Dentre os estudos,

destacaram-se os desenvolvidos pelos ingleses, belgas e holandeses (MACHADO, 2007). Sendo responsável por modificar o conceito tradicional de impermeabilização, os concretos drenantes eram aplicados em rodovias e aeroportos (DUMKE, 2005).

Ainda no mesmo período, Virgiliis (2009) aponta que um marco no uso do pavimento permeável nos Estados Unidos como agente que contribui na redução dos impactos ambientais se deu com a pesquisa realizada por Edmund Thelem e engenheiros do Instituto Franklin da Philadelphia que, apoiados pela U.S. Environmental Protection Agency (EPA), fez manuseio do concreto asfáltico poroso no controle de cheias, mas tarde foi produzido um manual prático de projetos e construção desse tipo de pavimento por Field et. al., em 1982.

No território francês, o governo propôs um programa de pesquisa e desenvolvimento em 1978 a fim de resolver questões relacionadas às inundações, onde o pavimento permeável ganhou destaque (QUEIROZ, 2015). A utilização dessa estrutura no Japão é inserida em programas que abrangem diversas técnicas de infiltração, de acordo com Watanabe (1995 apud Acioli, 2005, p. 9):

Tais técnicas são utilizadas principalmente nos quarteirões das grandes cidades, em lugares disponíveis e que podem ser inundados, tais como quadras de esporte de universidades, pátios de escolas etc. Pode-se citar como exemplo a cidade de Yokohama, que atingiu a marca de 4,4 milhões de habitantes em 1994, e por isso, desde 1982, tem estudado técnicas de controle de escoamento na fonte, dentre elas o pavimento permeável.

Em território brasileiro segundo Porto (1999 apud Dresch, 2016), a camada drenante com ligantes modificados por polímeros elastômeros sucedeu em meados de 1990, com o intuito de promover maior segurança no tráfego rodoviário e em pistas de aeroportos. A primeira aplicação experimental ocorreu em 1992 na Rodovia Bandeirante, estado de São Paulo, detentora de um dos tráfegos mais pesados do país. O acompanhamento efetivado desde a implantação do pavimento drenante mostrou que, apesar da redução na permeabilidade, o trecho exhibe resultados satisfatórios.

Infelizmente, a ocorrência de colmatção provoca a queda da taxa de infiltração em trechos com o decorrer dos anos, contudo o avanço tecnológico atrelado ao uso de materiais mais adequados permite a origem de misturas porosas com maior eficiência hidráulica e estrutural (VIRGILIIS, 2009). Sendo sinônimo de desenvolvimento desde os experimentos rudimentares, o pavimento permeável se enquadra como esforço para o aprimoramento das características superficiais dos convencionais, representando estruturas mais seguras e confortáveis ao tráfego dos usuários (DUMKE, 2005).

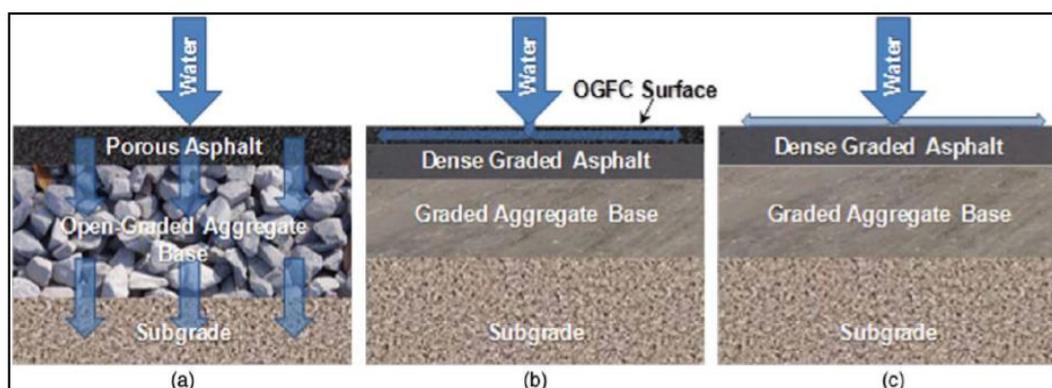
5.4.2 Tipologia e estrutura

Dentre as particularidades do pavimento permeável a de maior notoriedade é a capacidade de admissão de água no interior da estrutura através dos vazios existentes, fazendo que o desempenho hidráulico seja superior em relação aos outros pavimentos, reduzindo, com isso, o escoamento superficial em dias de precipitações.

Conforme explana Motta (2019) o funcionamento hidráulico desse tipo de pavimento é fundamentado por três princípios. O primeiro se refere à introdução imediata da água ao longo do sistema estrutural, que pode ocorrer tanto de forma distribuída por meio de revestimentos porosos, quanto localizada com a incorporação de drenos laterais ou bocas de lobo. O segundo compreende a estocagem temporária no interior dos vazios da camada do pavimento, que possui função de reservatório. E por último, o terceiro corresponde à evacuação cedida de maneira lenta através da infiltração no solo ou disponibilização para a rede de drenagem, podendo ser feita de maneira conjunta.

Ilustrada por meio da Figura 12, a percolação da água pode advir por toda a estrutura do pavimento (a) ou apenas no revestimento (b), ficando retida, assim, sobre uma camada de asfalto densa. Para aqueles sem a presença de uma camada porosa (c) a água não adentra a estrutura e permanece escoando na superfície. Podendo ocorrer a condução da água para a camada permeável com o uso de dispositivos de drenagem sem necessitar de revestimento permeável.

Figura 12 - Percolação em: (a) pavimento asfáltico poroso, (b) pavimento asfáltico com revestimento poroso e (c) pavimento asfáltico convencional.



Fonte: Putman e Kline (2012 apud Queiroz, 2016).

Com isso, as particularidades estruturais e os tipos dos pavimentos permeáveis são distinguidos e classificados, principalmente, quanto à entrada de água na estrutura, capacidade

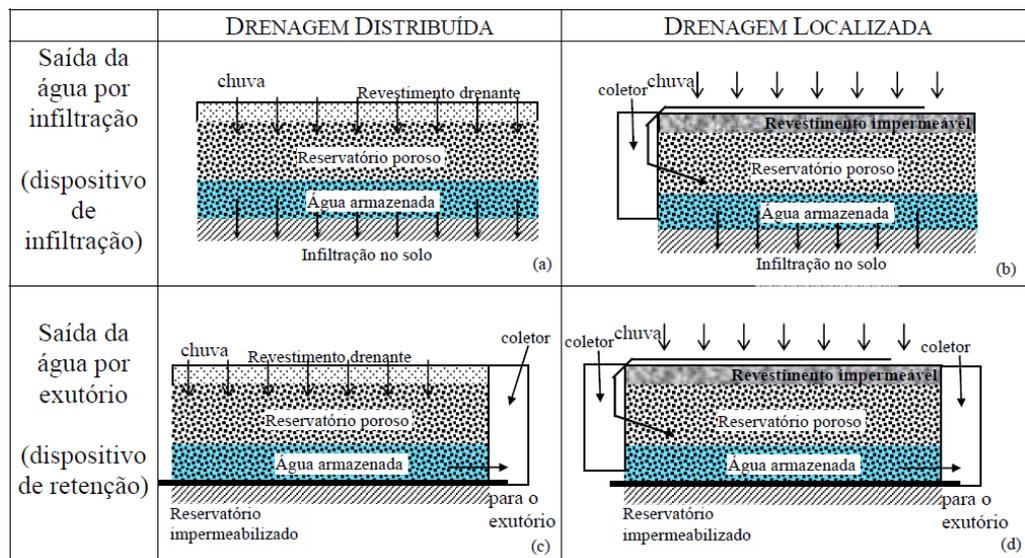
de armazenamento e evacuação do líquido, existindo estruturas com uma ou mais camadas porosas que podem ou não funcionar como reservatório.

Assim sendo, a camada de revestimento é evidenciada nos estudos por ser responsável, na maioria dos casos, pela entrada do líquido na estrutura do pavimento. Virgiliis (2009) esclarece quanto às diferenças encontradas na camada superficial de um pavimento referente à possibilidade de entrada de água. Assim, existem revestimentos de caráter impermeável, semipermeável e permeável, exemplificados, respectivamente, pelos pavimentos densos comumente utilizados nas vias urbanas e rodovias, blocos de concreto e concreto asfáltico porosos.

Alencar (2013) classifica o pavimento permeável com base na maneira que a água adentra a estrutura, no que consente a passagem pelas frestas e juntas localizadas sobre a superfície como os blocos de concreto pré-moldados vazados onde são plantadas gramíneas, e nos que proporcionam a entrada pelo corpo do revestimento, como os concretos asfálticos porosos e os concretos porosos de cimento Portland.

Por outro lado, Baptista, Nascimento e Barraud (2005 apud Motta, 2019) os rotulam considerando a atuação perante o escoamento superficial. Desse modo há pavimentos com revestimento superficial permeável, pavimentos dotados de estrutura porosa e aqueles que possuem estrutura porosa e dispositivos facilitadores de infiltração. Além de reduzir o escoamento, o primeiro tipo retém um volume moderado na camada de revestimento e permite a infiltração de uma parcela de água. O seguinte detém temporariamente pequenos volumes na camada reservatório, atenuando as vazões e modificando o hidrograma local. Já o último promove tanto a detenção temporária quanto a infiltração, desempenhando importante função na redução do deflúvio, atenuação de vazões e alteração do hidrograma.

Outra classificação, dada por Azzout *et al.* (1994 apud Acioli, 2005), divide os pavimentos permeáveis em quatro categorias que são distinguidas quanto à capacidade e emprego da estrutura seja na infiltração e/ou armazenamento das águas pluviais, como também na disposição do revestimento em concretizar a drenagem através da percolação da água ou da utilização de dispositivos coletores instalados de modo adjacente ao pavimento, assim como no direcionamento final ao solo ou para o sistema de drenagem. Uma maior compreensão das diferenças apontadas pelo autor pode ser observada através da Figura 13.

Figura 13 - Tipos de pavimentos com reservatório estrutural.

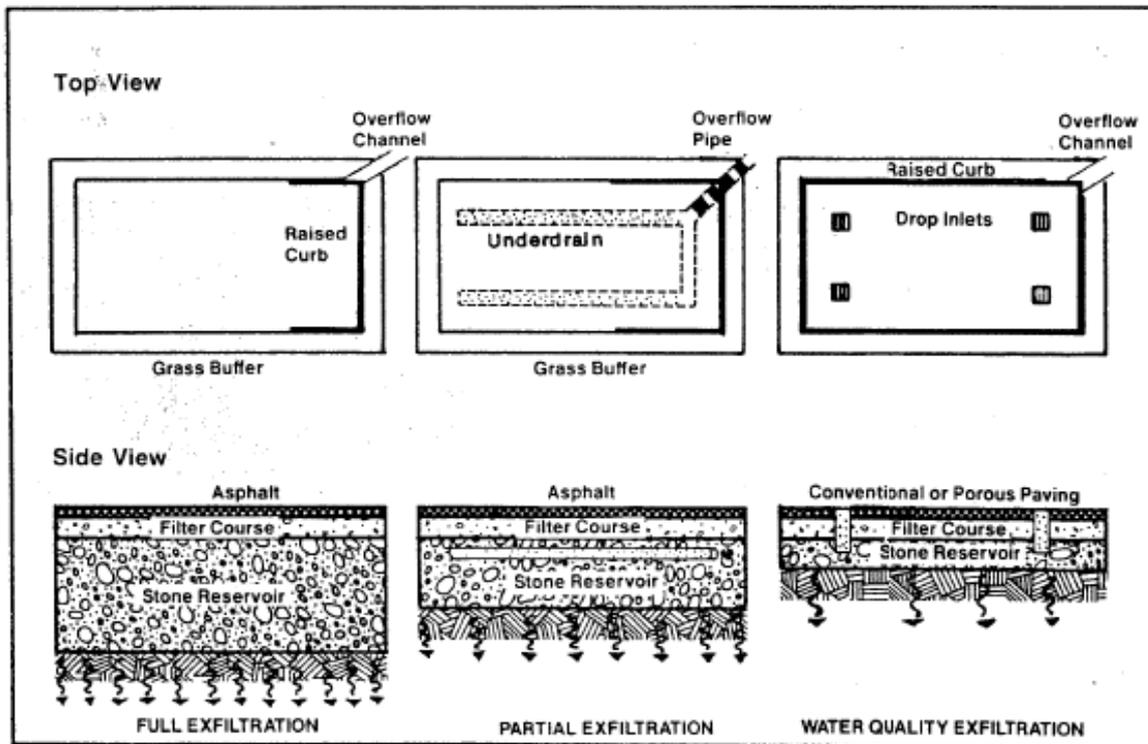
Fonte: Azzout *et al.* (1994 apud Acioli, 2005).

Pode-se ressaltar ainda que nos casos (a) e (b), ilustrados na imagem anterior, o deflúvio superficial acaba por abastecer as águas subterrâneas, contribuindo, em parte, na preservação do ciclo hidrológico. Já nas situações (c) e (d) o recurso natural pode ser aproveitado para fins menos nobres como irrigação de jardins, limpeza de praças e das vias urbanas.

Diante disso, Virgiliis (2009) enfatiza que o emprego apenas da superfície permeável contribui na redução do escoamento superficial e aquaplanagem, no entanto resultados significativos para o sistema de drenagem não é concretizado, necessitando, pois, de uma base ou sub-base porosa que garanta a retenção temporária das águas e provendo controle considerável no escoamento e, conseqüentemente, nos picos de cheias urbanas.

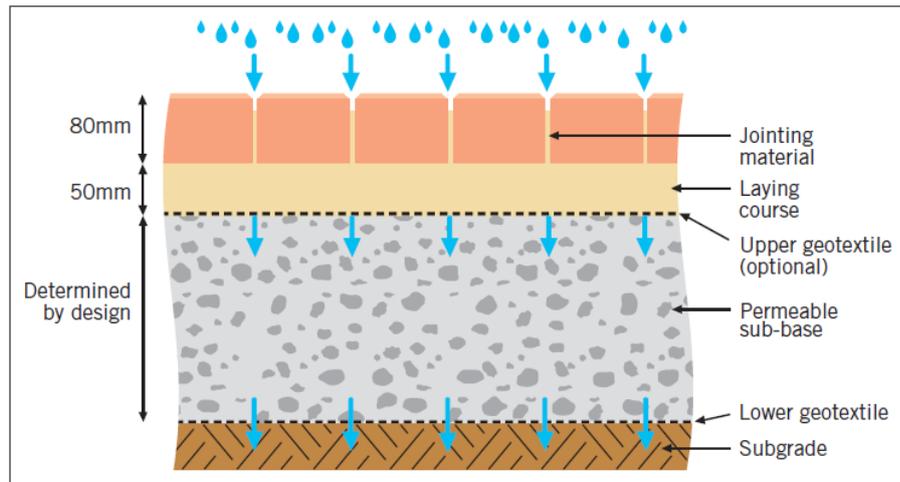
Por fim, Schueler (1987) diferencia os pavimentos permeáveis de acordo com três sistemas: sistema de infiltração total, sistema de infiltração parcial e sistema de infiltração para controle da qualidade da água. Baseados na capacidade de armazenamento provido pelo reservatório e da competência do solo quanto à infiltração da água decorrente do escoamento. As peculiaridades de cada um são caracterizadas conforme a Figura 14.

Figura 14 - Vista superior e lateral dos sistemas de infiltração do pavimento permeável.



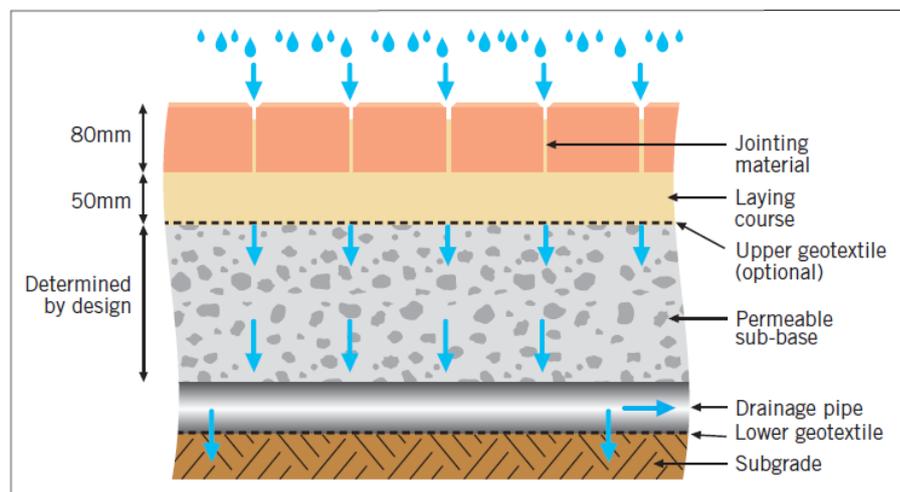
Fonte: Schueler (1987).

No sistema de infiltração total o único modo do líquido contido evacuar é a partir da infiltração direta no solo. Sendo assim, é necessário que o reservatório, constituído de material pétreo, tenha dimensões suficientes para comportar o volume de água projetado menos o infiltrado durante a precipitação. Com isso, tem-se que o pico de descarga, o volume e a qualidade da água sejam controlados totalmente pelo sistema, para quaisquer eventos de chuva com intensidade igual ou inferior a considerada no projeto. Com o propósito de suportar episódios que excedam o escoamento estabelecido em projeto é instalado um canal para o extravasamento acima do solo (SCHUELER, 1987). A Figura 15 apresenta, com maior clareza, um sistema de infiltração total.

Figura 15 - Sistemas de infiltração total.

Fonte: Interpave (2010).

Direcionados para terrenos com pouca capacidade de absorção, o sistema de infiltração parcial é indicado para casos onde não é prudente que toda a descarga gerada pelo escoamento seja assimilada pelo solo. Como consequência, realiza-se a instalação de um sistema de drenagem subterrânea composta por tubos com furos regularmente espaçados, dispostos na região superior do reservatório de pedras. O mecanismo fica incumbido de coletar e conduzir o escoamento excedente, não detido pelo reservatório, para uma saída central. O tamanho e o espaçamento da rede de drenagem deve considerar um tempo de retorno estimado de dois anos (SCHUELER, 1987). Para maior compreensão a Figura 16, a seguir, detalha esse tipo de sistema.

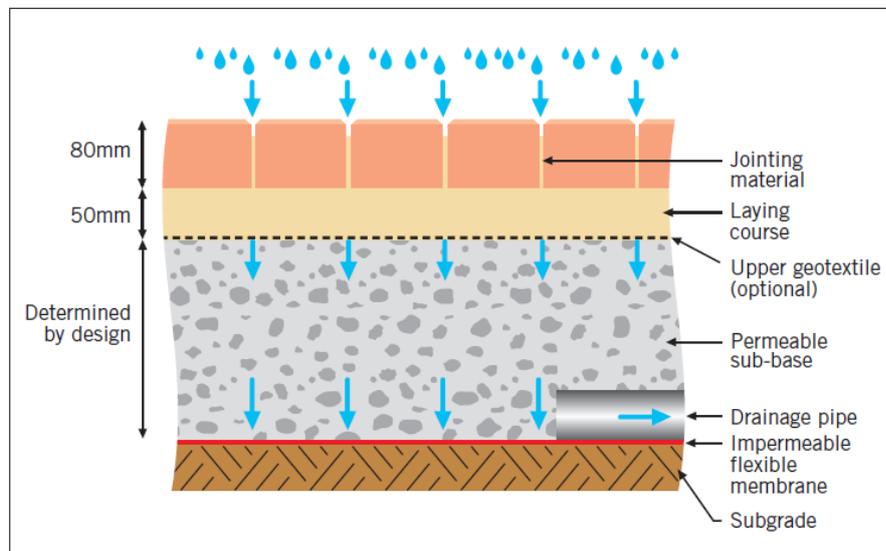
Figura 16 - Sistemas de infiltração parcial.

Fonte: Interpave (2010).

Finalmente, o sistema de infiltração para controle da qualidade da água tem o intuito de armazenar somente o *first flush* do escoamento, ou seja, a primeira descarga ou fluxo inicial da precipitação pluviométrica detentora da maior concentração de poluentes. O restante, não tratado pelo sistema, é direcionado para instalações de gerenciamento de águas pluviais através de drenos. Assim como o pavimento poroso, entradas como fendas podem ser utilizadas nos asfaltos convencionais a fim de conduzir água para um reservatório de pedra.

Interpave (2010) descreve a ocorrência dos sistemas de infiltração total e parcial, apresentados anteriormente, como também o sistema denominado sem infiltração (Figura 17). A distinção está na capacidade de captar toda a água através da instalação de membranas impermeáveis e flexíveis sobre o subleito e na lateral da sub-base, formando, assim, um tanque para armazenagem. Sendo aplicado em casos onde o subleito apresenta baixa permeabilidade ou baixa resistência que acarretaria danos com o acúmulo de água, são inseridos tubos de saída em locais apropriados para que o direcionamento seja efetivado a zonas de tratamento ou cursos de água.

Figura 17 - Sistemas sem infiltração.



Fonte: Interpave (2010).

Diante das classificações descritas, nota-se que a escolha do tipo do pavimento permeável a ser empregado irá depender da situação enquadrada pelo local de instalação, isto é, das peculiaridades geotécnicas do terreno natural e da profundidade do lençol freático, sendo então necessário o conhecimento prévio do solo (CASTRO, 2011).

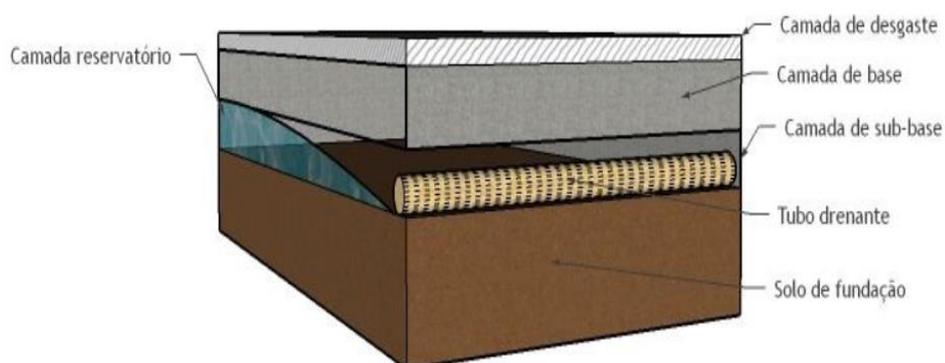
Quanto à estrutura, o pavimento permeável possui camadas semelhantes aos convencionais com o emprego de praticamente os mesmos materiais. A distinção está relacionada à capacidade de infiltração por meio dos poros, carecendo da inclusão de componentes que contribuam para o uso eficiente do sistema. Importante salientar que embora a base de diversos pavimentos convencionais apresente material poroso semelhante aos permeáveis, a impermeabilidade da superfície de revestimento impede a infiltração de água e o funcionamento tal como um (VIRGILIIS, 2009).

De acordo com Alencar (2013), a capacidade de suporte e a resistência dos elementos incorporadores do pavimento são dependentes das técnicas utilizadas para cada tipo. Sendo relatada a existência de pavimentos com anos de uso, compostos de blocos poliédricos de rocha, tanto em ruas como em rodovias, servindo de alicerce para grandes cargas mesmo sem a realização de manutenção. Por outro lado, segundo o autor, concretos porosos e técnicas com emprego de grama minimizam a capacidade de suporte. Assim, ficam restritos a calçadas, estacionamentos e vias de pequeno tráfego.

Semelhante aos tradicionais, os permeáveis também dispõem das três camadas principais, revestimento ou camada de desgaste, base e sub-base, onde cada qual exerce uma função correspondente. Conforme Virgiliis (2009), habitualmente ocorre a construção de duas camadas acima do sub-leito até o revestimento, sendo a combinação de materiais um fator de alcance para pavimentos mais econômicos. Pode ser necessário também, o aperfeiçoamento das camadas para finalidades especiais.

Diante disso, a estrutura de um pavimento permeável pode ser observada de acordo com o modelo simplificado exposto na Figura 18. Nela encontram-se as três camadas principais de um pavimento, o terreno de fundação e um componente utilizado para drenagem da camada que funciona como reservatório.

Figura 18 - Estrutura de um pavimento permeável.



Fonte: Trandem (2016), adaptado por Santos (2018).

Correspondente à porção mais superficial do pavimento, o revestimento ou camada de desgaste é responsável pelo contato direto com o tráfego e transferência da carga às inferiores. Segundo Virgiliis (2009), por ser composta com material resistente ao desgaste, trata-se da camada com maior valor econômico. Ademais, é requerido de maneira subjetiva atributos como aparência e acessibilidade.

Em alguns casos a camada superior do pavimento permeável é combinada de duas camadas (Figura 19), um revestimento impermeável com função estrutural localizado sobre a base da estrutura, e outra, denominada sobrecamada com características porosas e sem contribuição estrutural, com o intuito de proporcionar drenagem da água escoada. A camada porosa de atrito, conforme Virgiliis (2009) explana, é empregada em alguns trechos da rodovia a fim de sanar o efeito da aquaplanagem e *spray* ocorrentes durante os períodos chuvosos.

Figura 19 - Sobrecamada porosa mais revestimento convencional.



Fonte: Virgiliis (2009).

Localizadas sob o revestimento as camadas de base e a sub-base, com funções semelhantes à estrutura convencional, funcionam, também, como reservatórios. Desse modo, adquire toda a água originada no escoamento e armazena ou, a depender do caso, direciona ao sistema de drenagem, através de tubos, ou para infiltração no solo (TENREIRO, 2016).

Denominados também de colchão drenante, Virgiliis (2009) complementa que os reservatórios podem eliminar a água da chuva com o auxílio de tubos laterais, proporcionando o retardo dos picos de cheia, redução das consequências oriundas da erosão além de contribuir na diminuição dos gastos provenientes das estruturas dos sistemas de drenagem e dispositivos encontrados a jusante. Nas situações onde há infiltração direta ao solo, o sistema colabora na recarga dos aquíferos. Por fim, Virgiliis (2009, p. 36-37) adiciona que:

De maneira geral a estrutura de armazenagem que possui funções hidráulicas em determinada camada do pavimento é denominada de “Reservatório de Base”, que poderá ser drenado por tubos em qualquer altura dividindo a base em dois segmentos; um que tem a função de escoar a água excedente de dentro do reservatório para fora da estrutura e outro segmento abaixo que retém a água para infiltração. Ambos os segmentos possuem função estrutural, porém o segmento de baixo também possui função hidráulica.

Em resumo, o Quadro 1 apresenta as definições dos componentes pertencentes aos pavimentos permeáveis. Salieta-se, porém, que nem todas as estruturas dispõem dos elementos listados, sendo aplicados somente os requeridos para cada situação (Virgiliis, 2009).

Quadro 1 - Terminologia aplicada a pavimentos porosos.

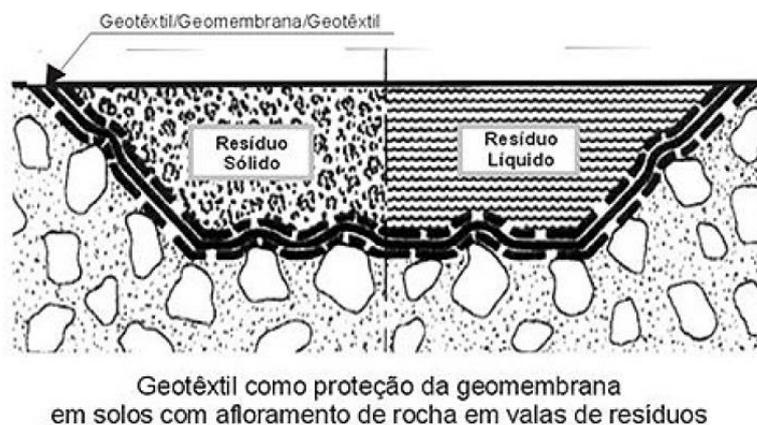
Terminologia aplicada a Pavimentos Porosos	
Terminologia	Definição
Camada de Base	Camada colocada abaixo da superfície de revestimento para aumenta a espessura do pavimento. Pode ser simplesmente chamada de Base.
Camada	Espaço ocupado entre dois tipos de materiais na estrutura do pavimento.
Camada Filtrante	Qualquer camada entre outros ou entre o pavimento e o subleito que detenha a migração de partículas para os vazios de camada subjacente.
Geomembrana	Tecido impermeável geralmente plástico ou Polietileno de Alta Densidade (PEAD) utilizada em sistemas impermeabilizantes.
Geotextil	Manta não-tecida de filamentos de polipropileno que possibilita a livre passagem das águas de infiltração para o meio drenante.
Pavimento	Qualquer tratamento ou cobertura na superfície que suporte qualquer tipo de tráfego.
Sobrecamada	Camada aplicada sobre qualquer tipo de pavimento preexistente.
Estrutura do Pavimento	Combinação de camadas de materiais colocadas sobre o subleito que possibilitam o suporte mecânico do pavimento.
Reservatório	Qualquer parte do pavimento com capacidade de estocagem o condutividade de água. O reservatório pode ser sobreposto ou combinado com outras camadas do pavimento. Também chamado de Reservatório de Base, Camada Drenante ou Colchão drenante.
Sub-base	Camada colocada abaixo da Base a fim de aumentar a espessura do pavimento.
Subleito	Solo natural ou reforçado abaixo da estrutura do pavimento, responsável pela absorção em última instância dos carregamentos.
Revestimento	Camada do pavimento que recebe diretamente a carga do tráfego.

Fonte: Virgiliis (2009).

Referente à aplicação de geomembrana e geotêxtil, têm-se que o primeiro é utilizado com a finalidade de impossibilitar a penetração da água para o subleito do pavimento ou, em situações de solo com material quimicamente tóxico, a contaminação das águas. Convém

também, o uso do tecido impermeável, abaixo da camada com função de retenção do fluido para posterior tratamento. Já o segundo, promove a separação dos materiais de camadas distintas, conservando a porosidade e impedindo o carreamento de partículas, proporcionando, assim, a conservação da singularidade da estrutura. A fim de exemplificar, a Figura 20 demonstra uma aplicação conjunta de ambos os geossintéticos.

Figura 20 - Aplicação de geomembrana conjugada com geotêxtil em reservatórios.



Fonte: ABINT (1999 apud Virgiliis, 2009).

Conforme a situação da imagem, o afloramento de rochas sob a geomembrana e o depósito de materiais na parte superior prejudica o desempenho pelo aparecimento de aberturas. Desse modo, a instalação de uma camada de geotêxtil em ambas as faces contribui na durabilidade do tecido impermeável, atuando como dispositivo de proteção.

5.4.3 *Materiais componentes*

Semelhante ao tradicional, os materiais da estrutura permeável são selecionados de acordo com o tipo do pavimento, a camada a compor e a função desempenhada. Para Alcioli (2005) a escolha deve ser baseada na máxima espessura admissível a cada camada, considerando fatores técnicos e econômicos, e as solicitações mecânicas requeridas ao pavimento durante a vida útil.

Dentre os materiais empregados o de maior utilização é o agregado, encontrado em todas as camadas pertencentes à estrutura. A distinção em relação ao pavimento convencional ocorre, principalmente, de acordo com a granulometria, sendo necessária uma distribuição que assegure maior concentração do número de vazios entre os grãos. Segundo Virgiliis (2009 p. 43):

Agregados em pavimentos porosos podem ser tratados como quaisquer materiais particulados tal como cascalho, pedregulho, pedra britada, RDC (resíduo de construção civil), material reciclado de blocos de concreto ou granito em decomposição dentre outros. A gradação uniforme deve resultar num volume de vazios da ordem de 30 a 40%, constituindo material extremamente permeável ao ar e a água. Além de ser o material mais utilizado na base e sub base dos pavimentos, é também o principal componente dos concretos porosos. É utilizado para preenchimento de blocos vazados, grelhas e geocélulas. Possui vantagens econômicas e ambientais por ser o material mais abundante e natural encontrado.

Por se tratar de uma estrutura porosa, o material utilizado deve apresentar boa qualidade, de modo a suportar as cargas aplicadas sobre o pavimento. Azzout *et al.* (1994 apud Acioli, 2005) destaca que para circunstâncias de tráfego pesado, a camada de base necessita apresentar maior resistência e menor deformação, assim é utilizado de material melhorado com ligante betuminoso ou hidráulico (concreto poroso) que, apesar dos benefícios, apresenta vazios inferiores e custos superior comparado à camada de brita comum. Salienta-se ainda, a importância do atendimento do volume de vazios, sobretudo para o reservatório, determinante na capacidade de armazenamento da estrutura.

Quanto ao revestimento, camada com material de maior custo e com contato direto ao tráfego, pode ser constituída de mistura betuminosa drenante, concreto poroso, bloco de concreto permeável, blocos vazados, dentre outros. De acordo com Tenreiro (2016), o material empregado na superfície de desgaste deve ser selecionado considerando a capacidade de resistência às cargas do tráfego, assim como a resposta à infiltração de água pluvial.

Consoante Gouveia (2019), os revestimentos de asfalto ou concreto drenante assemelham-se aos convencionais no que se refere aos componentes, entretanto é extraída uma porção de material com menor granulometria, tais como areia, proporcionando, assim, a existência de poros.

Composta por uma combinação de agregados britados, filler e cimento asfáltico puro ou modificado com polímeros, o concreto asfáltico permeável é definido como uma mistura oriunda da dosagem adequada de material granular e ligante, de modo a proporcionar a existência de vazios. Com a intenção de obter o máximo de permeabilidade, a concepção da mistura procura o menor teor de asfalto que certifique resistência à degradação das partículas e a deformação permanente através da quantidade apropriada de ligante e da distribuição granulométrica dos agregados (DUMKE, 2005).

Para que sejam assegurados os poros no revestimento, a curva granulométrica dos agregados deve apresentar uma descontinuidade, responsável pelo volume de vazios comunicantes que promove a permeabilidade da camada, conforme explica Dumke (2005). Esse fator é proveniente da retirada do material fino, mencionado anteriormente, que

preencheria os espaços vazios entre os grãos de maior granulometria nas misturas convencionais.

Considerando que os agregados serão atribuídos a uma camada superficial delgada, são necessárias algumas características para a garantia da qualidade já que o atrito interno do esqueleto mineral é o responsável pela resistência a deformação permanente da mistura, não sendo, pois, admissíveis materiais com desempenhos inferiores. Assim, a escolha deve ser baseada na boa resistência a desagregação, macrotextura e intertravamento adequado (DUMKE, 2005).

Outro material de grande importância na desenvoltura das misturas asfálticas drenantes é o ligante betuminoso, responsável, principalmente, pela convergência da mistura, de modo a impedir a desagregação em decorrência do tráfego. De acordo com Dumke (2005), a capacidade de coesão do ligante contribui para a resistência, sendo o melhoramento da adesividade alcançado por meio da adição de cal hidratada e de aditivos químicos líquidos.

Portanto, a junção do ligante asfáltico, dos agregados e aditivos, caso necessário, em quantidade adequadas origina a mistura betuminosa drenante. Na Figura 21, a seguir é possível observar a configuração desse tipo de mistura, vislumbrando a ocorrência de espaços vazios consideráveis, incomuns nas misturas convencionais.

Figura 21 - Mistura asfáltica drenante.



Fonte: Tenreiro (2016).

Alguns países, a fim de aprimorar o desempenho da mistura asfáltica drenante, utiliza-se ligante modificado por polímeros. Dentre os benefícios Zagonel (2013) destaca: aumento da coesão, melhoramento da adesividade, reduz a susceptibilidade térmica, baixa a viscosidade, promove um CAP com baixa fluência, maior resistência ao envelhecimento e aumento da resistência à deformação plástica, fissuração e a fadiga. Além disso, a incorporação de borracha proveniente de pneus e fibras de celulose é matéria de análise e

emprego nas misturas, com a finalidade de características físicas e reológicas melhores (DUMKE, 2005).

Apesar de resultar num ligante de melhor qualidade e comportamento Dumke (2005) revela que a utilização do ligante modificado por polímeros fica comprometida, em determinadas circunstâncias, por apresentar um custo inicial maior em comparação ao puro.

5.4.4 Vantagens e desvantagens

Diversas razões motivaram pesquisadores ao redor do mundo no estudo e desenvolvimento do pavimento permeável, a partir do interesse no acréscimo de qualidade e segurança na utilização da estrutura pavimentada.

Tenreiro (2016) aponta três pretextos principais, previamente abordados no tópico “Funcionalidade De Um Pavimento”, que resultam na ocorrência de alagamentos, acidentes de trânsito e riscos a saúde urbana. Em primeiro lugar, o excesso da impermeabilidade no ambiente urbano associados aos eventos de precipitação intensa que sobrecarregam o sistema de drenagem. Depois, a insegurança e desconforto proporcionado aos utentes das vias em razão do acúmulo de água na superfície do pavimento. Por fim, a emissão de ruídos decorrentes que podem ser reduzidos pela aplicação de camadas permeáveis no pavimento.

Para Machado (2007), fatores como a aderência dos pneus a via de tráfego, eliminação do *spray* ocasionado pelos veículos diante do acúmulo de água e a visualização de sinalização horizontal são estabelecidos como parâmetros que indicam a serventia e qualidade de serviço prestado aos usuários das vias. Desse modo, ao projetar o profissional deve se preocupar tanto com a capacidade de carga quanto pela retirada da água superficial e profunda prejudiciais ao desempenho e vida útil, assim como a segurança e o comportamento drenante do pavimento.

Gouveia (2019) revela que o pavimento permeável representa uma tecnologia viabilizadora da entrada e conseqüente percolação da água no solo contribuindo na drenagem urbana, recarga das águas subterrâneas e redução da propagação dos ruídos. Contudo a resistência mecânica da estrutura é reduzida em razão da presença de vazios, sendo utilizada, sobretudo, em faixas de rodovias suscetíveis a ocorrência de aquaplanagem.

Mediante o exposto, as peculiaridades do pavimento permeável cooperam para uma variedade de benefícios no que se refere ao conforto e segurança dos usuários e moradores adjacentes as vias, além das contribuições geradas ao meio ambiente. Dentre os acréscimos provenientes da aplicação do pavimento permeável, EPA (1999) destaca:

- Atuação no tratamento das águas pluviais a partir da remoção de poluentes;
- Redução da necessidade do uso de meio-fio e galerias de drenagem;
- Aumento da resistência à derrapagem e consequente segurança das vias de tráfego;
- Recarga dos aquíferos.

Outras vantagens que atingem diretamente os aspectos ambientais são apontadas pela Nacional Ready Mix Concrete Association (2008 apud Alencar, 2013):

- Ameniza o aquecimento das áreas urbanas, denominadas “ilhas de calor” através da menor absorção da radiação solar por possuir cor clara e estrutura menos densa;
- Promove a entrada de água e ar nas raízes das plantas, contribuindo na sobrevivência da arborização em áreas pavimentadas;
- Diminui o risco de aquaplanagem durante precipitações fortes.

Por fim, Machado (2007) complementa quanto às benfeitorias agregadas pela estrutura permeável:

- Menor distância de frenagem;
- Redução do *spray* oriundo dos pneus em dias chuvosos, melhorando a visibilidade;
- Diminuição na reflexão luminosa, suprimindo o efeito “espelho” e melhorando a visibilidade dos dispositivos de sinalização horizontal, durante o dia e a noite;
- Remoção rápida da água sobre a superfície de rolamento, reduzindo o tempo de permanência do pavimento molhado e a desestruturação acelerada;
- Origem dos pavimentos ditos “silenciosos” a partir do amortecimento do nível de ruídos aos usuários (ruído interno) e aos vizinhos (ruído externo).

Apesar das inúmeras vantagens introduzidas através do pavimento permeável, algumas desvantagens comprometem a receptividade e aplicação da estrutura drenante, principalmente pela necessidade de manutenção periódica.

De acordo com EPA (1999), o uso da estrutura pode ser restringido de acordo com as características locais como clima, ocorrência de erosão e de recarga de aquífero. Assim, regiões frias podem causar o entupimento e surgimento de trincas em função da presença de neve, já em locais de clima árido, o problema se dá com as altas amplitudes térmicas. Por

outro lado, onde ocorrem grandes taxas de erosão eólica resulta na geração de sedimentos que prejudicam os poros da superfície. Acrescentando também, a agência pontua:

- Carecimento de profissionais com experiência em relação à tecnologia;
- Obstrução com a falta de manutenção ou devido à incorreta instalação;
- O pavimento apresenta altos índices de falhas;
- De acordo com as condições de solo e da susceptibilidade do aquífero, ocorrem riscos de contaminação das águas subterrâneas;

Somando a esses problemas, Machado (2007) lista outras inconveniências que podem suceder a pavimento estudado:

- Aumento no número de acidentes em virtude do conforto e segurança agregados pelo pavimento, que contribui para o excesso de velocidade por parte de motoristas imprudentes;
- Custos mais elevados em relação ao convencional, em razão de materiais de qualidade superior e ligantes modificados com polímeros;
- Verificação do processo de colmatagem com o passar dos anos;
- Locais de frenagem e mudança brusca de velocidade favorece a desagregação pelo cisalhamento, não devendo, pois, ocorrer a aplicação.
- Desagregação superficial maior com o aumento do teor de vazios;

Pellizzari (2013) informa, ainda, que a eficácia do pavimento permeável tem relação com os cuidados estabelecidos:

- Manutenção, para precaver a ocorrência de colmatagem com o passar do tempo;
- Limitação estrutural pela redução da capacidade de suporte, visto que a camada de reservação é constituída por material granular com baixa compactação, assim indicado para locais com trânsito de veículos leves;
- Localização, sendo implantado apenas em locais com nível de lençol freático mínimo entre 0,6 m e 1,2m de profundidade em relação ao fundo do reservatório.

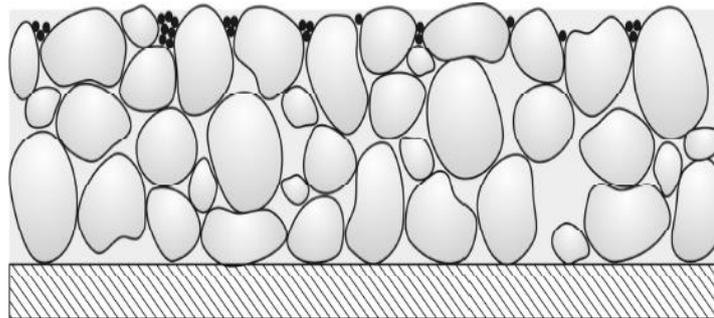
Por último, Santos (2018) revela que é necessária a manutenção e limpeza regular a fim de evitar os efeitos da colmatagem nos vazios do pavimento. Juntamente a isso, é recomendada a utilização em zonas de baixo tráfego, pois apresenta menor capacidade de carga.

Analisando as vantagens e desvantagens pontuadas, é possível perceber uma contradição com respeito à utilização dos pavimentos permeáveis, pois enquanto colabora na remoção de poluentes pode contaminar as águas subterrâneas. Percebe-se, então, a necessidade da especificação quanto às águas pluviais, aspectos físicos da região de instalação e vulnerabilidade do lençol freático (CASTRO, 2011).

Desse modo, a aplicação do pavimento permeável requer, sobretudo, um estudo aprofundado do local e dosagem adequada dos materiais a fim de evitar a desagregação e proporcionar o melhor desempenho, ademais é indispensável à presença de profissionais com conhecimentos abundantes a respeito da tecnologia.

Dentre os problemas listados, têm-se ainda que a colmatagem seja um dos mais prejudiciais à funcionalidade e vida útil da estrutura. A origem do problema ocorre com o transporte de materiais sólidos, através do tráfego, em conjunto com as partículas depositadas pelo vento sobre o pavimento, que com o tempo obstrui os poros da estrutura drenante, conforme ilustrado na Figura 22 (CASTRO, 2011).

Figura 22 - Pavimento permeável com a superfície colmatada.



Fonte: Castro (2011).

De acordo com Dumke (2005), a colmatagem causa a diminuição, de maneira gradativa, das funções hidráulicas e acústicas da estrutura permeável, de modo a culminar na perda definitiva com anos de uso, passando a operar como um pavimento impermeável convencional. Portanto, o efeito da colmatagem está conectado inteiramente com a duração do pavimento ou meio poroso (VIRGILIIS, 2009).

Conforme Castro (2011), diversas fontes contribuem para a concretização do pavimento colmatado como: partículas conduzidas pelos veículos, degradação dos veículos, proximidade de áreas verdes ou terrenos descobertos. Para Bochove (1995 apud Silva, 2005), aspectos como a quantidade de poluição, tamanhos e comunicação existente entre os vazios,

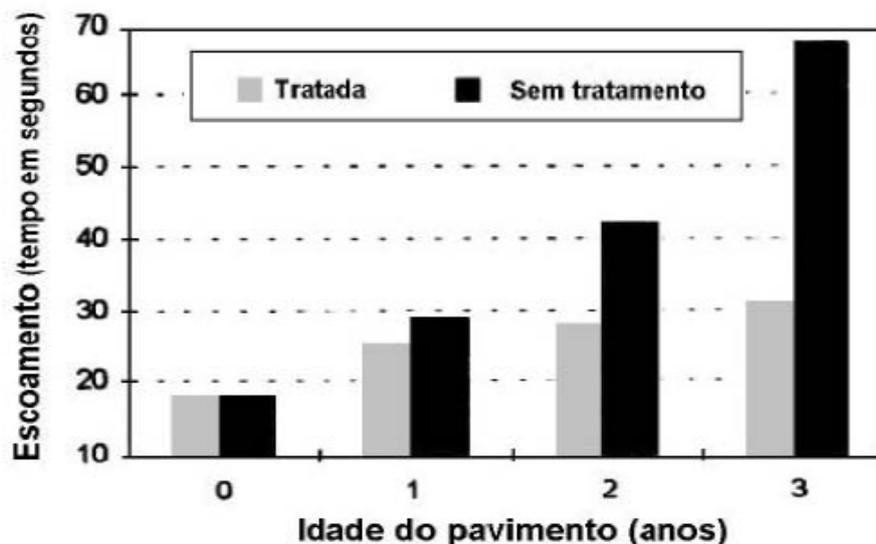
inclinação da camada densa sob a camada drenante e a velocidade e efeito de limpeza através da sucção promovida pelo tráfego influencia a incidência da colmatação.

Diante disso, a manutenção periódica do pavimento permeável colabora na longevidade e desempenho da estrutura. Segundo Dumke (2005), o uso de máquinas autopropulsadas, dotadas de dispositivo de espargimento e aspiração de água, é utilizado por alguns países, entretanto o alto custo o torna pouco usual. Dentre as características, o equipamento permite que grande parte da água empregada na limpeza seja filtrada e reutilizada durante a continuidade do processo.

Quanto à periodicidade da limpeza é estabelecido de acordo com as necessidades do local, genericamente o tempo limite para considerar a carência é de um ano após a instalação. Sendo propício a manutenção em qualquer período do ano. Recomenda-se para áreas próximas a terras agrícolas o momento imediato após a safra, em virtude da presença de resíduos. No caso de misturas antigas ou que será realizado a primeira limpeza, solicita-se a efetivação depois de chuvas prologadas, assim que as condições climáticas permitam (DUMKE, 2005).

No Gráfico 1, a seguir, é apresentada uma comparação realizada entre rodovias de origem espanhola quanto à evolução do efeito da colmatação em pavimentos drenantes com ou sem limpeza.

Gráfico 1 - Evolução da colmatação entre pavimentos tratados com limpeza e não tratados.



Fonte: Raz (1997, apud Dumke, 2005).

Perante a Figura anterior, tem-se que os pavimentos recebedores de limpeza apropriada apresentam um menor tempo de escoamento, ou seja, maior permeabilidade em

relação aos que não obtém o processo de manutenção. Heystraeten e Moraux (1990 apud Dumke, 2005) revelam que o acostamento sofre mais com a colmatagem em relação às faixas de tráfego, pois não sucede o efeito limpante natural do tráfego. Assim, é comum o uso de uma camada impermeável revestida ao longo do acostamento das vias.

5.5 Pavimentos porosos de camada simples e camada dupla

Em decorrência da porcentagem considerável de vazios ao longo das camadas do pavimento permeável, sua aplicabilidade acaba sendo restrita para situações de tráfego moderado. Portanto, o emprego do pavimento poroso brota como uma opção vantajosa na incorporação, principalmente, da propriedade drenante sem que haja comprometimento da capacidade estrutural (QUEIROZ, 2016).

Normalmente, o termo “pavimento permeável” é tratado para todo sistema pavimentado que permite a entrada de água por entre seus poros. No entanto, alguns autores, a exemplo de Thives *et al.* (2018), aponta que a denominação se refere aqueles cuja infiltração incide pelas variadas camadas do pavimento, tratando, dessa forma, do sistema geral. De modo distinto, o termo “pavimento poroso” se enquadra aos que possuem revestimento poroso, cuja permeabilidade ocorre apenas na camada superficial da estrutura.

De acordo com Castro *et al.* (2009), a diferença entre o pavimento permeável e o poroso ocorre em virtude do primeiro ser constituído por materiais impermeáveis, pré-fabricados, que através dos orifícios ou espaços entre as placas permite a infiltração de água para as camadas inferiores. Enquanto o segundo trata-se de uma estrutura composta por concreto ou asfalto com redução de finos, cuja infiltração se dar pelos vazios interconectados.

Quanto à aplicação, tem-se que nas estradas com baixo tráfego a estrutura do pavimento é passível da implantação de uma base e/ou sub-base permeável capaz de armazenar águas da chuva, enquanto que em rodovias ou estradas possuidoras de alto tráfego de veículos considera-se a adoção de uma camada superficial permeável sobre o pavimento tradicional, permitindo a infiltração e condução para as laterais da estrutura, reduzido os riscos advindos dos eventos de precipitação (CASTRO et al, 2009).

Dentre os pavimentos porosos empregados ao redor do mundo, a CPA (camada porosa de atrito) é um revestimento permeável, composta por uma faixa porosa, sem propósito estrutural, comumente aplicado sobre uma camada asfáltica impermeável, com função estrutural, geralmente, preexistente. Conforme Dumke (2005), a camada drenante concede o escoamento das águas pluviais por meio da existência de vazios comunicantes até o encontro

da faixa impermeável, onde, a partir das inclinações transversais, migra para os dispositivos laterais de drenagem presente na pista.

Para Bernucci *et al.* (2006), a camada porosa se enquadra como mistura a quente de graduação aberta no que se refere a distribuição dos agregados e fíler. Assim, a curva granulométrica uniforme favorece a existência de vazios conectados que possibilita, dentre outras vantagens, a diminuição da lâmina d'água e incidência de ruído.

A seguir, a Figura 23 (a) retrata uma via comporta por um trecho cuja parte do revestimento é do tipo CA seguida de CPA, sendo perceptível a diferença no comparecimento da água sobre as diferentes misturas. Pois, enquanto no segmento impermeável a água segue presente, no permeável a superfície exibe um aspecto seco em virtude da infiltração, como se pode observar com maior clareza na Figura 23 (b).

Figura 23 - Comportamento da CPA em dias de chuva.



(a) Trecho em CA seguido por trecho em CPA



(b) Trecho em CPA na Bahia

Fonte: Bernucci et al. (2006).

Condizente a DNER-ES 386/99, a camada porosa de atrito corresponde a uma mistura espalhada e comprimida a quente constituída de agregado, material de enchimento e cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero, caracterizada de maneira específica e desenvolvida em usina apropriada. Com porcentagem de vazios entre 18 e 25%, a composição granulométrica da mistura é ditada, de acordo com as especificações da norma rodoviária, através das cinco faixas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Faixas granulométricas para dosagem da camada porosa de atrito.

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

Fonte: DNER-ES 386/99.

Ainda segundo o especificado pelo documento brasileiro, as Faixas I e II são indicadas para camadas esbeltas com espessura de 3,0 cm, enquanto as demais se aplicam para espessuras de até 4,0 cm. A dosagem do CPA é realizada pelo método Marshall e o teor de ligante é adotado entre 4,0 e 6,0%.

Tal como qualquer pavimento permeável, apesar das vantagens e atributos funcionais proporcionados, o revestimento do tipo CPA sofre com os efeitos da colmatação com o passar dos anos. Hamzah e Hardiman (2005) exteriorizam que o asfalto poroso é suscetível ao entupimento dos poros e apresenta durabilidade inferior ao denso, resultando na perda da capacidade de absorção hidráulica e sonora em casos mais graves.

Relatado por meio de um estudo em campo na Europa, Kraemer (1990 apud Abdullah, 2012) expõem que o tempo de drenagem do asfalto poroso inicialmente era entre 25 e 75 segundos. No entanto, com o passar de 3 anos elevou para 80 a 100 segundos, e 160 a 400 segundos depois dos 9 anos de serventia. Outra narrativa, por Lane (2005 apud Abdullah, 2012), revela a diminuição da capacidade de drenagem com o decorrer de dois a três anos em função da obstrução dos vazios superficiais com a incidência de detritos e poeiras.

Apesar da absorção do ruído se tornar eficiente à medida que a graduação é mais fina, conforme indica Van Bochove (1996) citado por Hamzah e Hardiman (2005), tem-se uma maior propensão ao entupimento da camada porosa. Assim, um novo tipo de asfalto poroso foi desenvolvido com o intuito de retardar o efeito da colmatação e contribuir tanto na drenagem quanto na redução de ruídos.

Consoante Abdullah (2012) o asfalto poroso de duas camadas, originado e denominado por *Twinlay* na Holanda, foi inventado em 1990 por Van Bochove da Heijmans Civil Engineering, sendo constituída na parte superior por uma mistura de graduação mais fina em comparação a camada inferior.

De modo a englobar as propriedades do pavimento asfáltico poroso de uma camada e de pavimentos com superfície fina, a faixa mais externa é projetada com a finalidade de evitar a obstrução dos vazios e perda do material. Já os vazios existentes entre as camadas devem estar conectados para que seja admitida a passagem de água e a absorção do ruído, proveniente do ar pressionado pelos pneus dos veículos (LIU; HUANG; XUE, 2016).

Hamzah (2007) expõem que a camada inferior, com maior espessura e tamanho dos grãos, possui permeabilidade elevada em relação ao pavimento poroso convencional, melhorando a rapidez da drenagem. Por sua vez, a camada superior, com tamanho de grãos menores, funciona como filtro ao impedir o acesso de sujeiras às camadas posteriores. Com o passar dos anos, a fina faixa superficial, passa por um processo, relativamente fácil, de limpeza através da pulverização e sucção a vácuo que retiram os resíduos acumulados.

Segundo Van Bochove (1995 apud Masondo, 2001), a limpeza do asfalto poroso *Twinlay* é mais eficaz, pois as partículas de sujeira permanecem próximas à superfície, sendo constatada, através da observação visual, a introdução por volta de 1,0 a 1,5 cm de profundidade. Masondo (2001) explana, ainda, que a limpeza deve ocorrer de uma a duas vezes ao ano, de acordo com a gravidade da poluição no local de implantação, culminando na recuperação quase que total das propriedades funcionais.

Quanto às características, KLIMEŠ (2012) aponta a presença de 16 a 22% de vazios na camada superior e 22 a 28% na camada inferior. O autor revela, ainda, que a durabilidade do pavimento poroso de duas camadas na Holanda, local mais utilizado da Europa, é de 8 anos.

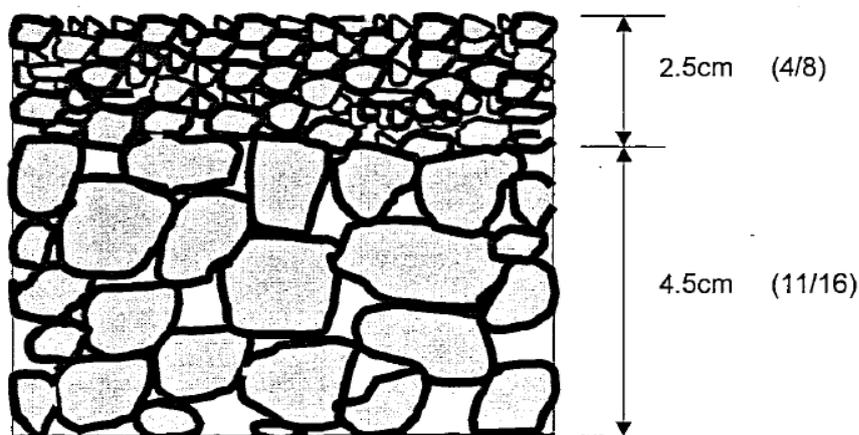
No que refere à espessura das camadas porosas e do tamanho do agregado, Hamzah (2007) expõem que a camada superior apresenta 25 mm e 4-8 mm de graduação fina, já a camada inferior é caracterizada por apresentar 45 mm e 11-16 mm de graduação grossa. Outra opção, ainda, é apresentada com superfície dita superfina, 20 mm e agregado de 2-6 cm, e camada inferior mais espessa, com 50 mm, e agregados de 11-16 mm, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Graduação dos agregados para asfalto poroso de duas camadas.

Sieve Size (mm)	Twinlay Top Layer (4/8)	Twinlay M Top Layer (2/6)	Twinlay Bottom Layer (11/16)
16.0			7.1
11.2	0		80.5
8.0	6.2	0	87.2
5.6	57.4	2.6	87.6
4.0	85	30.8	
2.0	87.2	80.5	88.7
0.5	88.0	86.5	93.2
0.18	90.3	88.8	94.7
0.063	93.4	92	95.7
< 0.063	6.6	8.0	4.3
SBS Modified Binder	6.0	6.5	4.2

Fonte: Van Bochove (2005 apud Hamzah, 2007).

Com a Figura 24, a seguir, observa-se a representação de um pavimento poroso *Twinlay* onde a camada superior apresenta 2,5 cm e a inferior 4,5 cm conforme as características granulométricas anteriores.

Figura 24 - Estrutura de asfalto poroso de camada dupla.

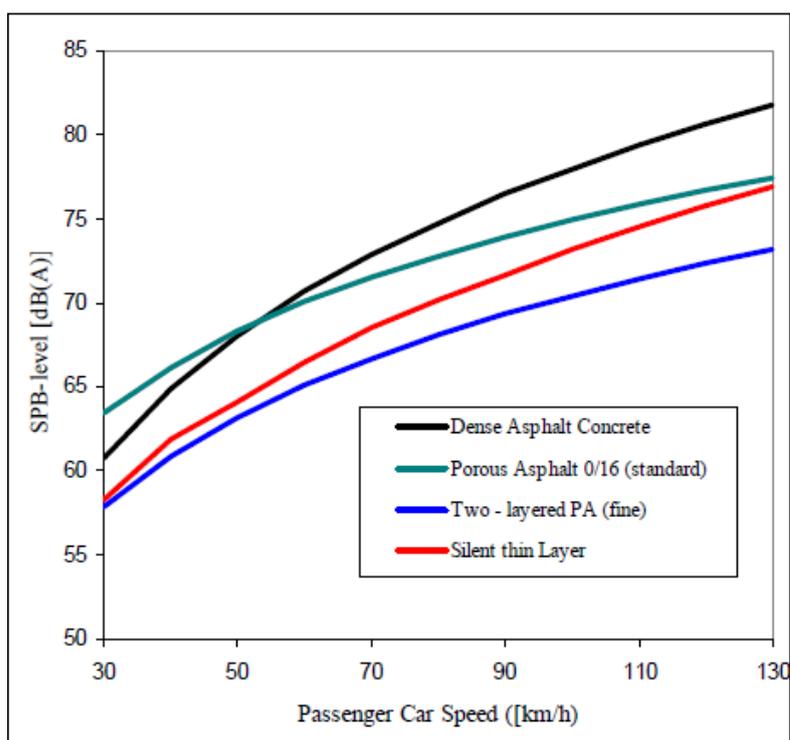
Fonte: Masondo (2001).

Conforme Hamzah (2007) existem duas maneiras de posicionar e compactar o pavimento poroso duplo: quente sobre quente ou quente sobre frio. No primeiro caso, as camadas são colocadas simultaneamente. No outro, inicialmente, a camada inferior é alocada e compactada, e posteriormente, a superior passa pelo mesmo processo. Além do mais, a construção das camadas porosas foi considerada sensível às intempéries, particularmente pelo método quente sobre frio, onde a camada ultrafina esfria rapidamente diante o clima frio. O autor informa, ainda, sobre a menor permeabilidade obtida nas amostras produzidas com a

segunda técnica, comparadas com exemplares da primeira, pelo estudante Ton Van der Steen da universidade TU Delft. Desse modo, a construção das camadas pelo método quente sobre quente revela como melhor opção para assegurar suas características.

Por fim, diante os benefícios funcionais adicionadas com o asfalto poroso de duas camadas, destaca-se a capacidade de menor geração de ruído independente da velocidade de tráfego, conforme o observado a partir do Gráfico 2.

Gráfico 2- Geração de níveis de ruído para diferentes tipos de superfície.



Fonte: Hamzah (2007).

Por meio do diagrama anterior, conclui-se que o asfalto poroso de uma camada apresenta bom desempenho, contrapondo ao denso, quanto à propagação de ruídos para velocidades superiores a 50 km/h. Assim, Hamzah (2007) explana a não indicação para regiões urbanas com velocidades inferiores, principalmente, por não promover a autolimpeza resultante da movimentação rápida dos veículos. De maneira distinta, o pavimento poroso duplo pode ser aplicado em diversas localidades, pois para qualquer velocidade apresenta menor geração de ruído em relação ao denso, sendo indicado para rodovias de tráfego rápido como também para vias urbanas de baixa rapidez.

Diante do exposto, os tópicos a seguir abordarão de maneira sucinta resultados, obtidos através da implantação, como também da experimentação de amostras em laboratório,

principalmente quanto ao comportamento funcional, de pavimentos porosos de uma e duas camadas por autores brasileiros e de outros países.

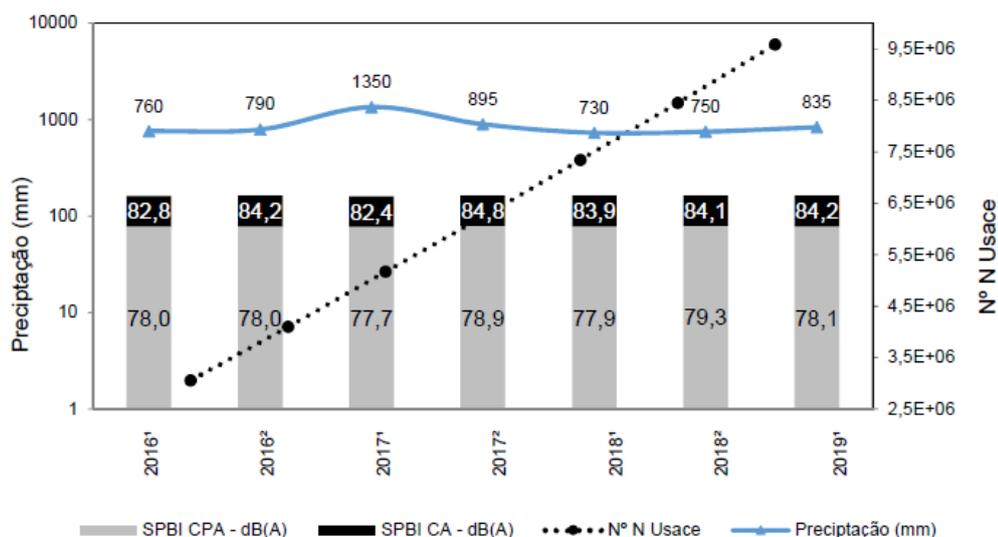
5.5.1 Comportamento do pavimento poroso tipo CPA em relação ao CA

Por meio de um estudo apresentado na Universidade Federal de Santa Maria, Alves (2019) descreveu ensaios executados em laboratório através de amostras com três granulometrias distintas e medições do NPS nas rodovias BR-158 e BR-285 no Rio Grande do Sul, situadas no Brasil, de modo a verificar o desempenho mecânico, funcional e ambiental da CPA em comparação ao CA convencional.

Para as etapas efetivadas em laboratório, o autor realizou a moldagem de corpos de provas de acordo com o teor de projeto de 4% do ligante AMP 60/85, determinado a partir de alguns parâmetros, e um volume de vazios que varia de 19,7% a 21,3%, dentro do intervalo exigido pela norma brasileira. Quanto aos agregados, foram utilizadas distribuições granulométricas distintas condizentes com uma Faixa Americana e as Faixas IV e V para a CPA, conforme o DNIT.

Dentre os ensaios realizados por Alves (2019) destaca-se: resistência à tração, módulo de resiliência, ensaio uniaxial e triaxial de carga repetida, coeficiente de absorção acústica utilizando o tubo de impedância, medições do nível sonoro com o índice de passagem, verificação do ATR, macrotextura, microtextura e drenabilidade.

Através da metodologia aplicada pelo autor, obteve-se que o pavimento CA localizado na BR-158 apresentou SPBI \cong 84,0 dB (A), consistindo no maior valor de ruído médio ao longo dos quatro anos abordados, em contrapartida, os trechos em CPA propiciaram um número próximos a 78,0 dB (A), conforme apresentado na Gráfico 3. Mesmo para os segmentos mais antigos, executado a mais de 15 anos no km 617 da rodovia BR-285, o valor foi de 78,3 dB (A), e o mais jovem, com cerca de 3 anos de liberação, apresentou 77,3 dB (A) dentro da margem de erro, \pm 1,0 dB (A), do sonômetro utilizado pelo pesquisador.

Gráfico 3 – Gráfico comparando o SPBI em CPA da BR-158.

Fonte: Alves (2019).

Assim, a redução do nível de ruído a partir da diferença dos números do CPA e do CA é de cerca de 6,0 dB (A), apontando a eficiência da camada na absorção do som indesejável em comparação ao concreto asfáltico usual. Ainda segundo o autor, esse resultado prevalece ao longo da vida útil do pavimento em razão da limpeza periódica dos poros que ocorre, provavelmente, em razão dos períodos chuvosos incidentes na região, de modo a reduzir o efeito da colmatagem do revestimento.

Em continuação, foi observada, também, a influência da distância a fonte de geração do ruído. Desse modo, num alcance de 7,5 m obteve SPBI = 79,3 dB (A), que passou a apresentar 74,0 dB (A) aos 15 m e 68,4 dB (A) aos 30 m. Com isso, apenas a uma distância de 180,0 m o NPS seria 55,0 dB (A), concordante com a NBR 10151/2000. Para o CA o valor ocorre apenas a uma longitude estimada de 2000 m. O autor apontou que o aumento de velocidade e a presença de água no pavimento contribui para um maior valor de NPS gerado com a interação pneu-pavimento.

No que diz respeito à deformação permanente da mistura porosa, é informado que o trecho do Km 522 na BR-285 (CPA Faixa V e N $\cong 1,86 \times 10^7$), com aproximadamente 15 anos de abertura, assim como o Km 617 da mesma (CPA Faixa V e N $\cong 6,18 \times 10^6$), 2 anos de execução, e o da BR-158 (CPA Faixa V e N $\cong 9,59 \times 10^6$), com 5 anos, possuem volume de tráfego considerado médio ou superior. No entanto, deformações computáveis pelo método da treliça de haste móvel central não foram alcançadas por Alves (2019) para as camadas porosas de atrito. Sendo obtidos resultados, apenas, pelo método do perfilômetro inercial

laser, com valor das ATRs inferiores a 7,0 mm, limite estabelecido pela ANTT, para todos os segmentos abordados.

Dos ensaios laboratoriais para verificar a deformação permanente nas situações de amostras com ou sem confinamento e avaliar os critérios de FN em função do tráfego, foi indicado que as faixas suportariam um leve volume de tráfego. Contudo os valores obtidos em campo demonstraram a capacidade de suporte tráfegos maiores sem o acometimento de grandes deformações. Em função dessa discrepância, o autor alerta sobre a necessidade de um aprofundamento nos estudos relacionados a utilização do FN como critério de análise quanto à deformação permanente das misturas asfálticas porosas.

Em meio à avaliação mecânica e funcional das amostras, Alves (2019) destaca que apenas a Faixa V da mistura CPA com teor de ligante 5,0% apresentou valor inferior a 0,55 Mpa, limite estabelecido pela norma DNER-ES 386/99, para a RT. Com os resultados para o módulo de resiliência, ele conclui que a deformabilidade aumenta com a quantidade de ligante e, conseqüentemente, o MR diminui, assim a rigidez da mistura é reduzida dependendo do ligante asfáltico inserido. Dos valores obtidos para a PM, foi revelado um comportamento próximo entre as misturas, dentro do instituído pela norma para teores de 4,0 e 4,5%. Dentre as misturas elaboradas em laboratório, é afirmado que a Faixa IV obteve melhor desempenho funcional e mecânico em relação às demais faixas, sendo pertinente a elaboração de um trecho com a mistura.

Por fim, no que se referem à microtextura, os trechos estudados se adequam ao recomendado por DNIT (2006), com VRD ≥ 55 dado em função da rugosidade da superfície do pavimento. Por fim, o autor esclarece que os trechos escolhidos transpassam áreas agrícolas, sendo suscetível a colmatação, com visualizada através da redução da capacidade drenante do CPA, localizada na BR 158, durante os primeiros anos de uma média de 0,33 l/s para 0,22 l/s.

Outro estudo apresentando por Daibert *et al.* (2019), teve o intuito de verificar a capacidade do CPA como agente redutor de acidentes em dias chuvosos. Assim, diante dos acidentes recorrentes na cidade de Sorocaba, estado de São Paulo, ele efetivou um estudo de caso a partir da aplicação da CPA em uma alça de acesso à rodovia Dr. Celso Charuri, cujo pavimento, implantado no ano de 2002, era caracterizado como semirrígido invertido com base granular e sub-base estabilizada com cimento e revestimento constituído de concreto asfáltico usinado a quente.

Dentre as características tem-se que o trecho, com velocidade de operação regulamentada de 60 km/h, recebe volume diário médio com cerca de 3500 veículos

comerciais e 15000 veículos de passeio, sobre uma distribuição quase que uniforme no decorrer do ano. O índice pluviométrico local é elevado, principalmente entre os meses de dezembro e janeiro, com mais de 200 mm mensais. No ano de 2018, dos 20 acidentes constatados, 70% ocorreram em dias chuvosos, conforme relata os autores.

Assim, foi executada no trecho uma mistura asfáltica constituída, dentre outros materiais, com CAP 60/85 adicionado de polímero DuPont Elvaloy RET e uma pequena proporção de fibra de celulose, aplicada entre os dias 22 e 26 de novembro de 2018 com espessura de 3 cm.

Com os experimentos realizados a partir de um levantamento em fevereiro do ano seguinte, os autores constataram, através do ensaio de permeabilidade, uma condutividade hidráulica na ordem de 10^{-1} cm/s e 10^{-2} cm/s conforme o esperado para o material, com duas exceções localizadas no acostamento que apresentou mistura quase impermeável.

Quanto a textura, ao analisar o ensaio de mancha de areia, notaram que a camada densa anterior possuía textura superficial média na faixa 1 e grosseira na faixa 2. Após a aplicação foi classificada como muito grosseira ou muito aberta segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT, resultando em maior atrito pneu-pavimento e, conseqüentemente, segurança no tráfego.

Outro fator a considerar é o conforto agregado ao usuário com a redução do ruído, dado a partir da medição no interior do veículo antes e depois da aplicação da CPA. Sendo revelado pelos autores uma redução de 2,2 dB (A), que apesar de pequeno em relação ao visto por meio da bibliografia anterior, mostra a utilidade do material, principalmente, em áreas urbanas.

Por último, os autores destacam a não ocorrência de acidentes no trecho no período que engloba os meses de dezembro de 2018 a abril de 2019 que, conforme relatado anteriormente, compreende os meses de maiores índices pluviométricos no local. Com isso, Daibert *et al.* (2019) consideram a modificação no trecho bem sucedida.

Distintamente, por meio de uma simulação, Leão e Dias (2004) compararam a capacidade de absorção das águas pluviais pelo CPA e asfalto convencional em uma avenida real localizada na cidade de Ouro Branco estado de Minas Gerais. Nomeada como Av. Mariza de Souza Mendes, apresenta um desnível topográfico próximo a 78 m, com 5 cm de revestimento composto por CAP 50/70.

Para a simulação, os autores consideraram que a camada de CPA futura teria 25% de volume de vazios interligados, coeficiente de escoamento superficial de 0,58 e espessura de 5

cm. Já o pavimento convencional presente, contém 5% de vazios e coeficiente de escoamento superficial de 0,90.

O cálculo se deu através das fórmulas de Kirpich, intensidade da chuva e Método Racional, associados ao cálculo dos volumes armazenado e escoado. Os valores dos coeficientes para a equação da chuva na cidade correspondente foi obtido, pelos autores, com o uso do programa *Plúvio 2.1*.

Com isso, foi obtido que a CPA absorve 87,41% do volume escoado, ao mesmo tempo em que o concreto asfáltico convencional detém apenas 11,24% para a intensidade de chuva apresentado na localidade. Assim a aplicação da CPA se mostrou viável perante a simulação, pois acarretaria na redução do escoamento superficial e prevenção de enchentes à jusante, além de propiciar um trânsito mais seguro e menos sujeito a aquaplanagem.

5.5.2 Comportamento do pavimento poroso de dupla camada em relação ao simples

Yoo, Lee e Han (2020) documentaram resultados obtidos com a avaliação da diferença de ruído no pavimento poroso de camada única e dupla pelo método CPX, que proporciona uma medição próxima ao pneumático e a superfície da estrada, de modo a adquirir apenas a parcela resultante do contato entre o pneu-pavimento. Os trechos dos pavimentos cujos testes foram efetivados são adjacentes e localizados na cidade de Sejong.

Compostos por asfalto modificado com características padronizadas conforme o Ministério de Terras, Infraestrutura e Transportes da Coreia do Sul, o revestimento poroso de camada única analisado possui uma espessura de 5 cm e diâmetro máximo de 13 mm, com porosidade de 20%, enquanto o duplo é constituído por uma camada superior de 2 cm, diâmetro máximo de 8 mm, e uma inferior de 3 cm, diâmetro de 13 mm, ambas superfícies com porosidade de 20%.

Através dos dados coletados em ambos os pavimentos para as velocidades de 50, 60, 70 e 80 km/h, os autores concluíram que o revestimento de dupla camada porosa reduz, em relação ao de camada única, 6,56 dB (A) em média. Ao considerar que o de camada única reduz 3,0 dB (A) comparado com outros pavimentos usuais, os autores reiteraram a eficácia dos pavimentos porosos na redução do ruído gerado pelo tráfego, principalmente aqueles detentores de duas camadas porosas.

Em outra análise, por meio dos valores adquiridos com a aplicação do método SPB, Yoo, Lee e Han (2020) analisaram a redução do ruído oriundo do tráfego de veículos com a

aplicação dos pavimentos porosos de camada única e dupla. Os trechos analisados são os mesmos do trabalho citado anteriormente, localizados na cidade de Sejong.

Diferente do CPX o método SPS, método de passagem estatística, mede o ruído gerado a partir da passagem do veículo na margem da estrada. Para este caso consideram-se as características do tráfego como o volume e a velocidade. Dentre os resultados obtidos, os autores destacam que a redução do nível de ruído promovida pelo pavimento poroso de dupla camada foi numa média de 7,95 dB (A) em relação ao de uma camada porosa.

Ao considerar os problemas que afetam a desenvoltura do pavimento poroso o entupimento dos poros é o principal responsável pela perda da capacidade permeável. Diante disso, Hamzah e Hardiman (2005) estudaram a cerca do comportamento dos pavimentos porosos de uma e duas camadas quanto ao entupimento dos poros.

Ocorrido na Malásia, o estudo buscou verificar a consequência do diâmetro máximo dos agregados e a espessura da camada superior no entupimento da estrutura, a partir do teste desenvolvido no laboratório de engenharia rodoviária da University Sains Malaysia. Assim, moldaram duas amostras de pavimento poroso de dupla camada com espessura de 15, 20 e 30 mm, distintas pelo diâmetro máximo dos agregados da camada superior, entre 10 e 14 mm, enquanto que a inferior foi fixada com agregados de tamanho máximo de 20 mm.

Para compor a mistura os autores usaram um aglutinante convencional com grau de penetração 60/70 e um modificado com polímero SBS, sendo o teor de acordo com o tamanho máximo dos agregados de 10, 14 e 20 mm, respectivamente, iguais a 5,4%, 5,0% e 4,5%, para o primeiro ligante mencionado, e 5,7%, 5,2% e 4,6% para o segundo. Além disso, foi utilizada uma combinação de amostras, oriundas de locais distintos, de silte argiloso com a finalidade de simular o entupimento dos poros.

Do estudo, ponderaram que o pavimento poroso de duas camadas é mais resistente ao entupimento dos poros em relação ao poroso de camada única, e que conforme a espessura da camada superior é reduzida o tempo de obstrução aumenta. De acordo com eles, todas as amostras realizadas com SBS entupiram mais rapidamente.

Assim, o tempo de descarga para misturas com SBS, após a limpeza, foi de 80 a 100 s para revestimento poroso de camada única com agregado de diâmetro máximo igual a 10 mm, 75 a 115 s para os casos de camada dupla com 15 cm de espessura e 14 mm de tamanho máximo de agregado na camada superior, e de 70 a 75 s para o duplo com a mesma espessura e diâmetro máximo igual a 10 mm.

Tem-se ainda, que o de camada dupla com ligante convencional apresenta tempo de descarga 22,5% menor, após a limpeza, se comparados com o de camada única análogo, de 10

mm, ao passo que para o ligante SBS é de 37%, confirmando, assim, a maior eficiência do revestimento com camada dupla porosa em confronto ao simples. Além disso, os autores expõem que as misturas de camada dupla são limpas com mais facilidade em relação à de camada única.

Por último, Santos (2018) analisou a viabilidade do uso dos pavimentos permeáveis quanto os pontos de vista funcional e mecânico através de experimentos. A avaliação foi realizada através de um traço desenvolvido no concelho de Covilhã em Portugal a partir dos seguintes ensaios: Mancha de Areia, Pêndulo Britânico e Defletómetro de Impacto (FWD).

Executado em agosto de 2017, o pavimento experimental é constituído de 3 lugares de estacionamento cada qual com 2,5 x 5,0 m. O revestimento é composto por duas camadas drenantes, onde a superior possui 3 cm de espessura e a inferior 4 cm. A estrutura detém de uma camada de regularização de agregados 5/15 com 9 cm de espessura e reservatório com agregados 15/25 e 25 cm de espessura. A caracterização efetivou-se após cinco meses, sem a ocorrência da limpeza da superfície.

Através do ensaio Mancha de Areia, realizado a partir de dois equipamentos distintos, constatou-se que a profundidade média da textura nos pontos analisados foi superior a 1,2 mm, conforme o solicitado no CEEP (2014), e entre o intervalo de 0,5 e 5 mm, de acordo com a norma europeia EN 13036-1: 2010. Com isso, a macrotextura da camada superficial foi classificada como aberta, fator esse que proporciona maior capacidade de infiltração.

Do ensaio do Pêndulo Britânico, o autor confirma resultados satisfatórios do coeficiente de atrito pontual superiores a 60 conforme CEEP (2014), assegurando a segurança do tráfego em situação de piso molhado.

Por fim com o ensaio FWD Santos (2018) concluiu, ao comparar com valores dos pavimentos convencionais, que o pavimento permeável atua como uma solução eficaz, embora os números do módulo de deformabilidade tenham sido mais baixos.

6 CONCLUSÃO

Mediante a pesquisa bibliográfica, verificou-se a importância das estradas no desenvolvimento socioeconômico, propiciando tráfego seguro e eficiente. Dentre os atributos dos pavimentos usuais, é sabido que a impermeabilidade impede a entrada de água na estrutura. Tal fator atrelado à urbanização contribui na presença da lâmina de água e no aumento do escoamento superficial em dias chuvosos, ocasionando diversos problemas.

Assim, a fim da melhor atuação hidráulica originou o pavimento permeável que admite a drenagem e armazenamento temporário do deflúvio superficial. Ademais, estudos perceberam a aptidão na redução do ruído derivado do trânsito, que causa desconforto aos usuários e residentes próximos às vias, bem como problemas físicos e psicológicos.

Apesar de agregar aspectos funcionais, a diminuição da capacidade de suporte limita para locais de trânsito leve. Assim, o pavimento poroso é um tipo de revestimento que permite o aumento funcional sem que ocorra o comprometimento estrutural. Contudo, a colmatção atrapalha a desenvoltura e reduz a durabilidade da superfície drenante. Em função disso, foi desenvolvida a dupla camada porosa que filtra as partículas indesejadas, através de uma camada superior mais fina, reduzindo o efeito.

Embora apresente algumas desvantagens, os ensaios laboratoriais e as experiências em campo tem mostrado a eficiência quanto aos aspectos funcionais, mesmo em rodovias de tráfego médio a superior. Importante salientar, que para uma contribuição considerável na redução de alagamentos urbanos deve ser implantada uma base ou sub-base permeável, de modo a garantir drenagem de volumes maiores.

É possível aferir, ainda, que o pavimento poroso de camada única possui durabilidade maior em vias interurbanas de tráfego superiores. Pois, o efeito limpante pela movimentação rápida dos veículos reduz a colmatção. Somado a isso, estudos indicam que para velocidades maiores que 50 km/h a propagação de ruído é inferior ao pavimento usual.

Por outro lado, pontuando a menor geração de ruídos independente da velocidade, a camada superior filtrante e a facilidade na limpeza, o pavimento poroso de duas camadas pode ser aplicado para qualquer tipo de via. No entanto, requer maior cuidado no emprego, sendo mais indicado pelo método quente sobre quente.

Perante o exposto, os pavimentos permeáveis, podem ser considerados para o aprimoramento funcional das vias, melhorando, assim, a segurança e o conforto dos utentes e residentes próximos. Contudo, estudos devem ser efetivados considerando as mudanças e

peculiaridades do suporte lugar de instalação, observando a melhor distribuição granulométrica e propriedades do ligante.

No Brasil, devido às variações climáticas ao longo do território, é preciso que ocorram estudos mais apurados para cada região, principalmente em regiões quente, onde o amolecimento da mistura sobre altas temperaturas podem favorecer a colmatação. Somado a isso, a carência da limpeza urbana em algumas cidades pode resultar na ineficiência do pavimento em curto período de tempo, sendo fundamental a predominância de ambientes limpos a partir de cronogramas rigorosos e conscientização dos habitantes.

Por fim, o estudo contribuiu na aprendizagem da estrutura permeável e serve como base na realização de trabalhos futuros com possível aplicação prática, pois, em virtude da pandemia da Covid-19, foi impossibilitada a realização de experimentos. Entretanto, pode-se verificar, por meio de trabalhos desenvolvidos pelos diversos autores, a eficiência funcional das camadas porosas.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, N. H. **Laboratory simulative clogging behaviour and fracture toughness of one and two-layer porous asphalt**. 2012. 46p. Doctoral thesis – Universiti Sains Malaysia, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151: Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2000.

ACIOLI, L. A. **Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte**. 2005. 162 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ALENCAR, P. C. D. D. **Avaliação Experimental do Concreto Poroso na Atenuação do Escoamento Superficial em Parcelas Urbanizadas**. 2013. 174 f. Dissertação (Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ALVES, A. **Comportamento Mecânico, Funcional e Ambiental de Misturas Asfálticas Porosas**. 2019. 228 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

ANTUNES, P. T. D. S. C. **Uso do Pavimento Permeável de Concreto para Atenuação de Cheias Urbanas**. 2017. 132 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

ARAÚJO, J. L. D. **Características Funcionais e Mecânicas de Misturas Asfálticas Para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários**. 2009. 147 f. Dissertação (Mestre em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BEUTER, N. C. **Análise da Viabilidade da Pavimentação Asfáltica em uma Estrada Intermunicipal: Um Estudo de Caso Nas Cidades de Condor e Panambi do Noroeste Gaúcho**. 2020. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2020.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: Abeda, 2006.

BONFIM, B. Aquaplanagem causa acidente com dois feridos na Rodovia Assis Chateaubriand, dizem bombeiros. **G1**, Presidente Prudente, 03 fev. 2020. SP. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/presidente-prudente-regiao/noticia/2020/02/03/aquaplanagem-causa-acidente-com-dois-feridos-na-rodovia-assis-chateaubriand-dizem-bombeiros.ghtml>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil – MTPA. **Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária 2010-2017**. Brasília, 2017. 75 p.

BREITENBACH, J. **Estudo do Efeito da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades Mecânicas de Módulo de Resiliência e Resistência a Tração das Misturas**

Asfálticas. 2016. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

CAMINHÃO sai da pista e carro capota em dia de chuva com pelo menos quatro acidentes por aquaplanagem na BR – 101. **ClickPB**, 19 jun. 2020. Paraíba. Disponível em: <<https://www.clickpb.com.br/paraiba/caminhao-sai-da-pista-e-carro-capota-em-dia-de-chuva-com-pelo-menos-quatro-acidentes-por-aquaplanagem-na-br-101-286121.html>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

CASTRO, A. S. **Uso de Pavimentos Permeáveis e Coberturas Verdes no Controle Qualiquantitativo do Escoamento Superficial Urbano.** 2011. 161 f. Tese (Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CASTRO, J. et al. Estudio de dosificaciones em laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 24, n. 3, p. 271 – 284, diciembre, 2009.

CEEP - **Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, Ex-Estradas de Portugal.** Pavimentação, Métodos Construtivos, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Painel CNT de Consultas Dinâmicas dos Acidentes Rodoviários.** Brasília, 2020.

DAIBERT, R. F. et al. Estudo Da Aplicação De Camada Porosa De Atrito (Cpa) Para Redução De Acidentes Em Dias Chuvosos Em Trecho Experimental. In: **9º Congresso Rodoviário Português**, LNEC, Lisboa, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação.** 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de projeto e práticas operacionais para segurança nas rodovias.** Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 386/99:** Especificação de serviço. Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999.

DRESCH, F. **Comportamento de Misturas Asfálticas Tipo Camada Porosa de Atrito (CPA).** 2016. 165 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

DUMKE, M. P. **Concreto Asfáltico Drenante com Fibras de Celulose, Ligante Modificado por Polímero e Asfalto-borracha.** 2005. 111 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ECHEVERRIA, J. A. S. **Avaliação do efeito de restaurações com fresagem e recapeamento nas condições funcional e estrutural de pavimentos com volume de**

tráfego médio. 2009. 157 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

EPA. **Storm Water Technology Fact Sheet Porous Pavement.** EPA 832-F-99-023. Office of Water, Washington DC, 1999.

FAGUNDES, P. M. **Avaliação do Comportamento Funcional de Misturas Asfálticas do Tipo BBDr e BBTM.** 2020. 136 f. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

FARIAS, H. Chuva forte em Joinville causa alagamentos durante a noite. **NSC Total**, 18 mar. 2021. Notícias. Disponível em: <<https://www.nsctotal.com.br/noticias/chuva-forte-em-joinville-causa-alagamentos-durante-a-noite>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

FERGUSON, B. K. **Porous Pavements: Integrative Studies in Water Management and Land Development.** United States of America: Taylor & Francis, 2005. 600 p.

FONSECA, A. M. **Avaliação da Influência do Controle Tecnológico na Qualidade de Obras de Pavimentação – Estudo de Caso: Viário de Parque Olímpico.** 2016. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

FORTES chuvas causam alagamentos em pontos de João Pessoa nesta quinta-feira (18). **G1 PB**, 18 mar. 2021. Notícia. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2021/03/18/fortes-chuvas-causam-alagamentos-em-pontos-de-joao-pessoa.ghtml>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

FRANCISCO, V. D. L. F. **A Drenagem Superficial e o Seu Impacto Funcional e Estrutural na Vida dos Pavimentos Rodoviários.** 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Vias de Comunicação) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2009.

FRANZ, C. M.; SEBERINO, J. R. V. **A História do Trânsito e sua Evolução.** 2012. 24 f. Monografia (Especialista em Gestão, Educação e Direito do Trânsito) – Faculdade Dom Bosco, Joinville, 2012.

FURTADO, D. B. **Projeto de Dosagem e Dimensionamento de um Pavimento Asfáltico Poroso para uma Área de Estacionamento.** 2017. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

GERMAN-GONZÁLEZ, M.; SANTILLÁN, A. O. Del concepto de ruido urbano de paisaje sonoro. **Bitácora Urbano Territorial**, Colombia, vol. 1, n. 10, p. 39-52, enero-diciembre, 2006.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 6. Ed. São Paulo: Atlas, 2017. 129 p.

GOUVEIA, M. A. D. O. **Asfalto Drenante: Proporções Granulométricas e Aplicabilidade.** 2019. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2019.

GUEDES, C. D. S. **Avaliação do Desempenho Hidrológico de Pavimentos Permeáveis**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestre em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2015.

GUNZI, A. Pavimentos de Concreto e Estruturas de Dados. **Forgotten Lore**, 2016. Disponível em: <<https://ideiasesquecidas.com/2016/05/23/pavimentos-de-concreto-e-estruturas-de-dados/>>. Acesso em: 03 mar. 2021.

HAMZAH, M. O. Double layer porous asphalt in the netherlands and field monitoring in belgium. In: **Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 6, p. 285-285, 2007.

HAMZAH, M. O.; HARDIMAN. Characterization of the clogging behaviour of double layer porous asphalt. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 6, p. 968-980, 2005.

INTERPAVE. **Permeable pavements: guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements**. Edition 6, The Precast Concrete Paving and Kerb association, 2010.

JUNIOR, L. I. V. **Hidroplanagem: Caracterização e Análise da Incidência em Rodovias**. 2009. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola e Engenharia, Porto Alegre, 2009.

JÚNIOR, P. G. F. **Projeto e construção de um dispositivo para caracterização do ruído pneu-pavimento**. 2017. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília, 2017.

KLIMEŠ, P. **Dvouvrstvý Koberec Drenážní S Asfaltem Modifikovaným Pryžovým Granulátem**. 2012. 63 stran. Diplomová Práce. Vysoké Učení Technické V Brně. Fakulta Stavební. Ústav Pozemních Komunikací. Brno, 2012.

KNABBEN, R. M. **Desenvolvimento do trailer-CPX e de uma mistura asfáltica de baixa emissão de ruído pneu-pavimento**. 2017. 372 f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

KÖCHE, J. C. **Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2011. 185 p

LEÃO, J. E. C.; DIAS, T. C. **Estudo de Concreto Asfáltico Drenante: Camada Porosa de Atrito (CPA)**. 2014. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São João Del-Rei, Ouro Branco, 2014.

LESKI, J. R. **Análise comparativa do ruído produzido pelo tráfego de veículos leves em diferentes superfícies de rolamento, nas condições motor ligado e desligado**. 2012. 117 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

LIU, M.; HUANG, X.; XUE, G. Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 5, n. 1, p. 183-196, 2016.

MACHADO, R. Z. **Asfalto modificado com polímero SBS para pavimentos drenantes**. 2007. 87 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MARÉ, F. L. **História das Infra-Estruturas Rodoviárias**. 2011. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

MASONDO, Phumlani Thulani. **Further development of Twinlay porous asphalt surfaces**. Doctoral thesis. Peninsula Technikon, 2001.

MOTTA, L. D. **Procedimentos de Projeto Viário em Pavimentos Permeáveis Com Base na ABNT NBR 16.416/2015 – Comparação Entre Blocos Permeáveis e Convencionais**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

NABESHIMA, C. K. Y.; ORSOLIN, K.; SANTOS, R. K. X. D. **Análise Comparativa Entre Sistemas de Pavimentação Urbana Baseados em Concreto Asfáltico e Blocos de Concreto Intertravados (Pavers)**. 2011. 123 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

NUNES, M. F. O. Poluição sonora em centros urbanos: o ruído de tráfego veicular. **Encontro Nacional De Engenharia De Produção**, v. 19, p. 1-11, 1999.

OMS recomenda limites de exposição à poluição sonora. **UOL Notícias**. 10 out. 2018. Notícias. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/deutschewelle/2018/10/10/oms-recomenda-limites-de-exposicao-a-poluicao-sonora.htm>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

PELLIZZARI, V. **Avaliação da Eficácia na Restauração da Capacidade de Infiltração da Camada Superior de Pavimentos Porosos**. 2013. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2013.

PEREIRA, A. H. P. **Caracterização Acústica de Pavimentos Rodoviários e Influência na Emissão Sonora**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2010.

PEREIRA, M. C. **Revestimentos Asfálticos: Tipos e Propriedades**. 2014. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2014.

PETROBRAS. **Asfalto Informações Técnicas**. Versão 1.1, 2015. Disponível em:<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/Asfalto-Informacoes_Tecnicas.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2021.

QUEIROZ, B. O. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com politereftalato de etileno (PET)**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

QUEIROZ, J. V. M. D. **Estudo de técnicas para mitigação de problemas de drenagem em pavimentos rodoviários**. 2015. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Unversidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2015.

RIBAS, A.; SCHMID, A.; RONCONI, E. Topofilia, conforto ambiental e o ruído urbano como risco ambiental: a percepção de moradores dos Setores Especiais Estruturais da cidade de Curitiba. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 21, n. 21, p. 183-199, jan./jun. 2010.

SANTOS, T. D. S. **Caracterização funcional e mecânica de um pavimento betuminoso permeável em troço experimental**. 2018. 93 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2018.

SÃO Paulo sai de estado de atenção para alagamentos após chuvas. **UOL Notícias**, São Paulo, 18 mar. 2021. Cotidiano. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2021/03/18/sao-paulo-entra-em-estado-de-atencao-para-alagamentos.htm>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

SCHUELER, T. R. **Controlling Urban Runoff: A Practical Manual For Planning And Designing Urban BMPs**. Washington DC: Matropolitan Washington Council of Governments, 1987.

SCHUH, G. A. **Avaliação da Adição de Fibra de Polipropileno em Misturas Asfálticas à Quente**. 2019. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2019.

SILVA, C. E. D. B. D. **Estudo da Permeabilidade de Misturas Asfálticas de Graduação Aberta**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SILVA, E. L. **Estudo de Patologias e Características de Drenagem em Revestimentos Flexíveis do Tipo CPA, TST e CBUQ em Rodovias**. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2018.

SILVA, J. F. F. **Alternativas para controle de alagamentos urbanos utilizando telhados verdes e pavimentos permeáveis em um bairro da cidade de Recife**. 2019. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

TENREIRO, R. J. C. **Pavimentos Betuminosos Permeáveis Resistência à Deformação Permanente da Camada Superficial**. 2016. 116 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2016.

THIVES, L. P. et al. Filtering Capability of Porous Asphalt Pavements. **Water**, v. 10, n. 2, p. 206, 2018.

VIRGILIIS, A. L. C. D. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. 191 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

YOO, I.; LEE, S.; HAN, D. Analysis of Noise Characteristics of Double and Single-layered Porous Pavement with CPX Method-National Route 1, Sejong-Si Section. **Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society**, v. 21, n. 10, p. 55-63, 2020.

YOO, I.; LEE, S.; HAN, D. Analysis of Traffic Noise for Single and Double Layered Porous Pavement with SPB Method-National Route 1, Sejong-Si Section. **Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society**, v. 21, n. 9, p. 92-102, 2020.

ZAGONEL, A. R. **Inovações em Revestimentos Asfálticos Utilizados no Brasil**. 2013. 115 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.