UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

ELISABETE SIMÃO VIEIRA

VITÓRIA REOS DA SILVA

PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL A PARTIR DA INCLUSÃO DE BASE/P.E.T

Tubarão

2021

ELISABETE SIMÃO VIEIRA
VITÓRIA REOS DA SILVA

PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL A PARTIR DA INCLUSÃO DE BASE/P.E.T

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Ismael Medeiros

Tubarão

2021

ELISABETE SIMÃO VIEIRA

VITÓRIA REOS DA SILVA

PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL A PARTIR DA INCLUSÃO DE BASE/P.E.T

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 21 de junho de 2021.

Assinado de forma digital por ISMAEL MEDEIROS:02876716909
Dados: 2021.07.05 16:56:16 -03'00'

Professor e orientador Ismael Medeiros
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Gercino Preve
Universidade do Sul de Santa Catarina

DIEGO GABRIEL DE SOUZA: 05310513906

Eng. Diego Gabriel de Souza
Áreas Engenharia Ltda.

Aos meus pais dedico este trabalho, os grandes pilares da formação da pessoa que sou hoje. Agradeço do fundo do meu coração.

Elisabete Simão Vieira

Dedico este trabalho aos meus pais, exemplos de honestidade e perseverança, modelos a serem seguidos. Orgulho de ser sua filha!

Vitória Reos da Silva

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio Teixeira Vieira e Valdete Simão Vieira, que apesar de todos as dificuldades, me ajudaram de todas as formas possíveis para que eu pudesse realizar meu sonho.

Aos meus irmãos, por todo o apoio e incentivo durante estes anos.

Ao meu namorado, Kaíque da Silva Lole, pela compreensão e incentivo.

Ao orientador, Ismael Medeiros, por toda a paciência e auxílio ao longo da elaboração deste projeto.

A minha dupla, Vitoria Reos da Silva, por tornar os dias mais alegres em meio a tantas dificuldades e por toda sua dedicação.

A equipe do laboratório de engenharia civil da universidade, em especial ao Pedro Zapelini, pelo seu auxilio na realização dos ensaios.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa.

Elisabete Simão Vieira

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João Mauro Pacheco da Silva e Maria de Lourdes Reos, que sempre me apoiaram em qualquer decisão, me incentivando em meio a problemas e dificuldades da qual devo minha eterna gratidão.

Ao meu companheiro, João Paulo Alves de Abreu, por todo apoio, compreensão e incentivo.

A equipe da Áreas Engenharia, em especial ao Diego Gabriel de Souza e Fillipe de Oliveira, por toda disponibilidade de horário e espaço e, principalmente, incentivo.

Ao meu orientador, Ismael Medeiros, por todo auxílio, confiança, disponibilidade e engajamento.

A minha dupla especial, Elisabete Simão Vieira, que em meio a muitos desesperos me ajudou, acalmou e incentivou, a sua dedicação é notável em tudo que faz.

A equipe do laboratório de engenharia civil da universidade, em especial ao Pedro Zapelini, que nos ajudou na realização dos ensaios imensamente.

A todos que de alguma forma me ajudaram, indiretamente ou diretamente, a minha gratidão.

Vitória Reos da Silva

" O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho." (Abraham Lincoln).

RESUMO

O primórdio do trabalho consiste na implantação de um pavimento flexível permeável com finalidade na diminuição de alagamentos em âmbitos urbanos. A indagação tem como principal função a junção da base granular com pó de P.E.T com diferentes teores, a fim de comprovar que a mistura mantém semelhança ou melhora em relação a base natural. Foram realizados ensaios com a caracterização da amostra pura e com seus teores, com finalidade de comprovar propriedades de compactação, resistência, expansão, penetração e permeabilidade de acordo com as instruções normativas. A mistura classificada como ideal foi a de 5% de pó de P.E.T, pois a mesma apresentou resultados similares com a base pura. As demais não tiveram um bom desempenho perante os ensaios, pois não atingiram aderência, compactação e resistência.

Palavras-chave: Base Granular. Teores. Adaptação.

ABSTRACT

The objective of this study is to implement a flexible, permeable pavement with the purpose of reducing flooding in urban areas. The main objective of this research is the junction of granular base with powder of P.E.T with diferent contentes, in order to prove that the mix maintains similarity of improves in relation to natural base. Tests were performed with the characterization of pure sample and its contentes, in order to prove compaction, properties, resistance, expansion, penetration and permeability according to the normative instructions. The ideal mix is classificated as 5% P.E.T dust, as the same results are similar to the pure base. The others didn't perform well in the tests, as they didn't reach adherence, compaction and resistance.

Keywords: Granular Base. Contents. Adaptation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Distribuição de cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis 21
Figura 2: Classificação de bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas 21
Figura 3 - Fluxograma para análise de viabilidade 24
Figura 4 - Exemplos de aplicação de alguns tipos de revestimentos permeáveis 25
Figura 5 - Comparativo entre os tipos de matérias para a camada superficial 26
Figura 6 - Exemplos dos diferentes tipos de pavimento com reservatório estrutural 28
Figura 7 - Fatores de equivalência de operação 30
Figura 8- Fluxograma do método a ser realizado 32
Figura 9 - Protótipo com modelo expandido 34
Figura 10 - Protótipo com modelo compactado 35
Figura 11 - Pó de PET 36
Figura 12 - Curva granulometria da base granular 37
Figura 13- Massa específica aparente seca x umidade ótima 38
Figura 14 - Curva CBR e sua expansão 39
Figura 15 - Leitura do CBR 40
Figura 16 - Gráfico da relação pressão x penetração do CBR 40
Figura 17 - Demonstração da vedação do ensaio de permeabilidade 41
Figura 18 - Classificação Casagrande 42
Figura 19 - Curva de compactação do teor 5% 45
Figura 20 - Curva de compactação teor 10% 47
Figura 21 - Curva de compactação teor 15% 48
Figura 22 - Corpos de prova em imersão com o extensômetro 49
Figura 23 - Prensa de CBR 50
Figura 24 - Gráfico de expansão do teor 5% 51
Figura 25 - Gráfico de expansão do teor 10% 51
Figura 26 – Mistura do teor de 15% saturada 52
Figura 27 - Gráfico de penetração do teor de 5% 53
Figura 28 – Gráfico de penetração do teor 10% 54
Figura 29 - Aplicação da argila plástica 55
Figura 30 - Parte superior do molde 55
Figura 31 - Carga hidráulica e tempo para o teor de 5% 56
Figura 32 - Escoamento da água no teor de 5% 57

Figura 33 - Carga hidráulica e tempo para teor de 10% 58
Figura 34 - Escoamento da água no teor de 10% 59
Figura 35 - Carga hidráulica e tempo para o teor de 15% 60
Figura 36 - Escoamento da água no teor de 15% 61
Figura 37 - Ensaio de RCS 62
Figura 38 - Estática descritiva com teor 5% 63
Figura 39 - Gráfico do tempo x resistência 63
Figura 40 - Hipótese de normalidade para o teor de 5% 64
Figura 41 - Gráfico de teste de normalidade para o teor de 5% 64
Figura 42 - Instabilidade do corpo de prova com mistura em 10% 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Agrupamento de eixos e determinação do fator de operação.....31

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Espessura mínima de revestimentos betuminosos 31
Quadro 2 - Granulometria da base 37
Quadro 3 - Massa específica aparente seco 38
Quadro 4 - Relatório de expansão 39
Quadro 5 - Leitura do ensaio de permeabilidade da base 41
Quadro 6 - Dados do corpo de prova do teor de 5% 44
Quadro 7 - Dados do ensaio de compactação o teor de 5% 45
Quadro 8 - Dados do corpo de prova do teor de 10% 46
Quadro 9 – Dados do ensaio de compactação do teor de 10% 46
Quadro 10 - Dados do corpo de prova do teor de 15% 47
Quadro 11 - Dados para curva de compactação do teor de 15% 48
Quadro 12 - Relatório de expansão do teor de 5% 50
Quadro 13 - Relatório de expansão do teor de 10% 51
Quadro 14 - Leituras do relógio comparador para o teor 5% 53
Quadro 15 - Leituras do relógio comparador para o teor 10% 54
Quadro 16 - Leituras de carga hidráulica e tempo para o teor de 5% 57
Quadro 17 - Leituras de carga hidráulica e tempo para o teor de 10% 58
Quadro 18 - Leituras de carga hidráulica e tempo para o teor de 15% 60
Quadro 19 - Valores do extensômetro com mistura de 5% 62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

P.E.T – Polietileno Tereftalato
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
DEINFRA – Departamento Estadual de Infraestrutura do Estado de Santa Catarina
R.C.S – Resistência à Compressão Simples
CNT – Confederação Nacional do Transporte
NBR – Norma Brasileira
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
UFPR – Universidade Federal do Paraná
CCP – Concreto de Cimento Portland
C.B.R – Índice de Suporte Califórnia

LISTA DE SÍMBOLOS

Vm – Volume médio de tráfego
V1 – Volume médio diário de tráfego (anual)
P – Período
t – Taxa de crescimento anual
Vt – Volume total de tráfego
N – Número de equivalências
F.E – Fator de eixos
F.C – Fator de carga
F.V – Fator de veículos

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Volume médio de tráfego 29
Equação 2 – Volme total de tráfego (num período) 29
Equação 3 – Eixo simples padrão 29
Equação 4 – Fator de carga 31
Equação 5 – Coeficiente de permeabilidade 41
Equação 6 – Massa específica aparentemente seca 44
Equação 7 – Teor de umidade 44
Equação 8 – Cálculo de expasão 49
Equação 9 – Cálculo do Índice de Suporte Califórnia 50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 JUSTIFICATIVA 17
1.2 OBJETIVOS 18
1.2.1 Objetivo geral 18
1.2.2 Objetivos específicos 18
2 REVISÃO DE LITERATURA 19
2.1 SITUAÇÃO DA PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL 19
2.2 PAVIMENTAÇÃO NAS VIAS URBANAS 19
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS 20
2.4 BASES E SUB-BASES FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDAS 21
2.5 BASE FLEXÍVEL PERMEÁVEL 22
2.5.1 Critérios construtivos 23
2.5.1.1 Análise de viabilidade técnica 23
2.5.1.2 Verificações complementares 24
2.5.1.3 Materiais e camadas 25
2.5.1.4 Reciclem do P.E.T 26
2.5.1.5 Interfaces entre camadas 27
2.6 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL 29
3 METODOLOGIA 32
3.1 CARACTERIZAÇÃO 32
3.1.1 Descrição das etapas do trabalho 33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 34
4.1 PROTÓTIPO 34
4.2 CARACTERÍSTICA DOS MATERIAIS 35
4.2.1 Politereftalato de etileno – P.E.T 35
4.2.2 Base granular/Análise de dados 36
4.3 SISTEMA PROPOSTO 42
4.3.1 Caracterização da proposta 43
4.3.2 Ensaios 43
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 66
REFERÊNCIAS 67

1 INTRODUÇÃO

Devido a concentração populacional nas grandes cidades, está cada vez maior o aumento das áreas impermeáveis. O resultado desta ação é o aumento das enchentes e inundações, o que torna perceptível os inúmeros problemas decorrentes do processo de urbanização irregular e falta de alternativas condizentes com a realidade.

Deste modo, faz-se necessário pesquisas destinadas a resolver este problema e garantir a segurança social. Com a ajuda da engenharia, a proposta inicial é realizar um estudo de resíduos P.E.T misturados no solo, com o intuído de um pavimento permeável de sistema de drenagem para reduzir o problema de incidências de inundações e enchentes nas áreas urbanas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Entre os 5.570 municípios brasileiros, mais da metade (59,4%) não possuem ferramentas de planejamento e gestão de risco. Apenas 25% dos municípios têm um plano diretor que leva em conta a prevenção de inundações e 23% declaram que possuem legislação para uso e ocupação do solo (IBGE, 2017).

Mediante os problemas potenciais anteriormente mencionados, ressalta-se, também, o alto índice populacional e uso do solo sem planejamento adequado, desse modo ocorrem as inundações durante os períodos de altas taxas de precipitação. A pesquisa tem como objetivo propor soluções técnicas de longo prazo para mitigar a incidência de alagamentos. Numa análise geral do contexto, pode-se optar por combinar um pavimento flexível permeável com um sistema de drenagem eficaz para minimizar a ocorrência de alagamentos nos municípios.

Desta forma, a implantação do pavimento permeável está relacionada à perda de resistência da camada e ao mecanismo final de preenchimento dos vazios com partículas ao decorrer do uso. Portanto, ressalta-se a relevância deste estudo para a aplicação do pavimento flexível permeável, podendo resolver o problema de resistência mecânica da base da pavimentação para, finalmente, continuar a analisar a viabilidade de implementação do modelo em áreas sujeitas a inundações.

Devido ao problema geral do sistema, estudos analíticos serão realizados na cidade de Tubarão/SC para implantação do pavimento permeável em junção com o sistema de drenagem complementar, desenvolvida como forma alternativa de mitigação de enchentes em pontos estratégicos da cidade com critérios e conceitos específicos.

Finalmente, entrando no quesito de pavimentações urbanas, será que é possível amenizar o índice de alagamento desenvolvendo um traço na mistura base/PET de forma que altere sua permeabilidade para a redução de inundações urbanas?

1.2 OBJETIVOS

Neste trabalho será abordado a temática proposta e os objetivos gerais e específicos de acordo com a análise do âmbito contextual.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver traço na mistura base/PET de forma a alterar suas condicionantes de permeabilidade, mantendo-a dentro das especificações do DEINFRA para uma melhor drenagem e funcionalidade quando aplicados em obras de infraestrutura urbana.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização do resíduo (PET);
- Realizar ensaios de caracterização básica da base;
- Realizar ensaios de granulometria, compactação, densidade e permeabilidade na mistura da base;
- Realizar ensaios de R.C.S. na mistura da base;
- Desenvolver matriz de comparação entre os resultados obtidos e os resultados ditos “tabelados”.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SITUAÇÃO DA PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL

Segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), aproximadamente 57% apresentam algum tipo de problema na pavimentação. Apesar das melhoras durante os anos, a falta de investimento é uma das principais causas das péssimas condições das rodovias brasileiras.

O levantamento recorrente da Confederação, realizado em 2018, revelou que seria necessário um investimento total de 48,08 bilhões para a recuperação das vias desgastadas e correção dos problemas mais urgentes. Resultados desta mesma pesquisa indicaram 454 trechos com pontos críticos, sendo pontos situados ao longo da via que podem trazer graves riscos à segurança dos usuários, além dos custos adicionais de operação.

2.2 PAVIMENTAÇÃO NAS VIAS URBANAS

Bernucci *et al*. (2010), ressalta que a estrutura do pavimento consiste em múltiplas camadas com espessuras que se diferem, tendo como finalidade resistir aos esforços provenientes dos climas e, principalmente, do tráfego, além de proporcionar conforto aos usuários e melhores condições de economia e segurança.

De acordo com a NBR 7207 (ABNT, 1982), o pavimento é constituído por quatro camadas que devem atender suas respectivas atribuições de desempenho, para garantir as solicitações de esforços calculadas em projeto, cujas camadas são:

- Subleito: é o terreno da fundação do pavimento que faz conexão com as outras camadas;
- Sub-base: é a camada que permite a regularização do subleito, sendo complementar a base;
- Base: é a camada que tem por atribuição aliviar as tensões nas demais camadas e permitir a drenagem das águas que se infiltram;
- Revestimento: é onde concentra-se os esforços diretos dos rolamentos dos veículos, sendo destinada a melhoraria da comodidade e segurança além de resistir ao desgaste, aumentando a durabilidade da estrutura.

O Manual de Pavimentação DNIT (2006), mostra as propriedades físicas e mecânicas na qual deve ter mais atenção no campo rodoviário, destacam-se as seguintes:

a) Permeabilidade: É a característica do solo no qual permite a passagem de água sob a ação da gravidade ou outras forças;

b) Capilaridade: Este é um traço do solo no qual apresenta poder de absorver água por meio da tensão superficial;

c) Compressibilidade: Tem como particularidade o solo deformado para reduzir seu volume sob a ação da compressão;

d) Elasticidade: O solo tem como aspecto restaurar a forma, a original e reduzir a força de deformação. Quando o solo não é elástico, a deformação ocorre de forma parcial;

e) Contratilidade e Expansibilidade: É mais sensível no solo argiloso. A contratilidade é a peculiaridade do solo, onde tem seu volume reduzido devido a diminuição da umidade. A expansibilidade é a capacidade de expandir o volume aumentando a umidade do solo;

f) Resistência ao Cisalhamento: Nada mais é que a ruptura em massa das deformações.

As propriedades físicas e mecânicas do solo, destacadas anteriormente, são responsáveis pelos mecanismos de atenuação física de poluentes, como filtração e lixiviação, que, possibilitam, também, condições para que os processos químicos e biológicos possam ocorrer.

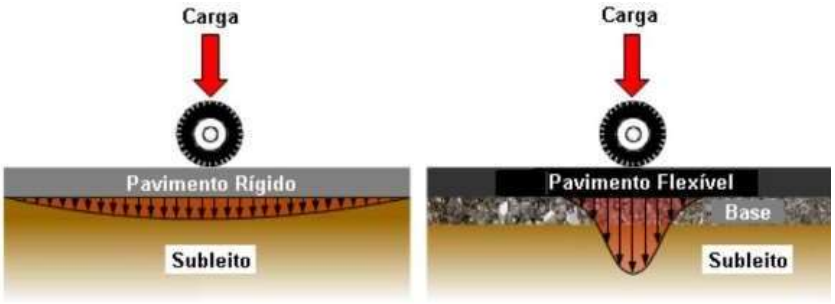
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

De forma contextual, o Manual de Pavimentação DNIT (2006) integra a classificação de pavimentação com a seguinte divisão:

I. **Flexível**: Camada na qual sofre deformações elástica significativa sob carregamento aplicado, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalente entre as camadas;
II. **Semi-Rígido**: É a camada cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias;
III. **Rígido**: Aquele em que o revestimento possui alta rigidez em relação as camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões decorrentes da carga aplicada.

Porém, Bernucci *et al*. (2006), divide o pavimento em apenas dois tipos básicos: flexíveis e rígidos. A forma de distribuição de cada tipo de pavimento, é indicada na figura 1.

Figura 1: Distribuição de cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: Departamento de transporte de UFPR (2009).

De acordo com o Departamento de transporte de UFPR (2009), por causa do alto módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland (CCP), o pavimento rígido tende a distribuir a carga em uma área maior do subleito comparado ao pavimento flexível que, além de utilizar mais camadas, distribui as cargas de forma concentrada no subleito.

2.4 BASES E SUB-BASES FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDAS

O manual de pavimentação do DNIT (2006), classifica as bases e sub-bases dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos da seguinte forma, como mostra a figura 2.

Figura 2: Classificação de bases e sub-bases flexíveis e semi-rígidas

Fonte: Manual de pavimentação, DNIT (2006)

As bases e sub-bases são classificadas em granulares e estabilizados (com aditivos), como mostrado anteriormente na figura 2.

Os granulares são consequentemente divididos em:

a) **Estabilização granulométrica:** consiste em camadas de solo, britas de rocha, escória de alto forno ou pelas misturas delas. A composição solo-brita é obtida a

partir das misturas de materiais naturais e pedra britada, assim como, quando é utilizado materiais de britagem, obtém-se brita graduada ou corrida;

b) **Macadame hidráulico:** consiste em camadas, abertamente granulares, que após a compressão tem os vazios preenchidos pelo material de enchimento, que é constituído por finos de britagem (pó de pedra) ou por solos de granulometria e plasticidade apropriados.

Após a classificação dos granulares, temos a classificação dos estabilizados (com aditivos), como distinguiremos a seguir:

a) Solo-cimento: baseia-se numa mistura devidamente compactada do solo, cimento Portland e água. Posto isso, a mistura deverá atender aos requisitos de densidade, durabilidade e resistência;

b) Solo-cal: mistura de solo, cal e água, por vez utilizados, também, cinza volante ou pozolana artificial;

c) Solo-betume: trata-se de uma mistura com material betuminoso, água e solo. Sendo considerada uma mistura flexível.

As classificações primárias dos estabilizados (com aditivos), passam por melhorias no material da mistura, como, por exemplo, no solo melhorado com cimento, a qual é obtida após a adição de porcentagens pequenas (2% a 4%) de teores de cimento. Assim, também no solo melhorado com cal, que tem sua forma inicial baseada na modificação do solo, no que se refere na sua plasticidade.

2.5 BASE FLEXÍVEL PERMEÁVEL

Para Virgiliis (2009), pavimentos permeáveis são aqueles que possuem porosidade e permeabilidade consideravelmente elevadas, a fim de afetar a hidrologia e ter um efeito positivo no meio ambiente no qual visa contemplar a drenagem urbana.

Segundo Ferguson (2005), um pavimento permeável é definido como um espaço livre na estrutura onde a água pode fluir, ela pode penetrar no solo ou ser transportada por meio de equipamentos auxiliares na drenagem. Este tipo de base tem como objetivo reduzir a quantidade de água associada ao escoamento, reduzindo a necessidade de sistema de drenagem urbana complexo e as inundações.

Há vários fatores positivos para a aplicação do pavimento permeável, mas para Aciolli, L.A. (2005), há pelo menos três fatores significantes entre eles:

1. O aumento da urbanização e seus problemas de infiltração exigem pesquisa e desenvolvimentos de soluções que auxiliem na drenagem, visando mitigar enchentes nos grandes centros;
2. A aplicação deste sistema em rodovias traz maior segurança e capacidade de manuseio no quesito aquaplanagem e efeito “chuveiro”;
3. Aplicado na ocasião de reduzir o nível de ruído, esse tipo de revestimento pode fazer o som penetrar, reduzindo assim a emissão de ondas sonoras.

Já para Gonçalves e Oliveira (2014), há limitações quanto ao uso de pavimentos permeáveis, quando, por exemplo, o subleito apresenta baixa permeabilidade ou o nível do lençol freático for alto. Neste caso, o sistema permeável tem a função de um poço de detenção, no qual deve-se tomar cuidado na hora de escolher os tubos de drenagem, pois tem utilidade de drenar a água contaminada que afeta o lençol freático. Sem esquecer, essencialmente, a falta de controle na execução do sistema, como na compactação e na manutenção.

2.5.1 Critérios construtivos

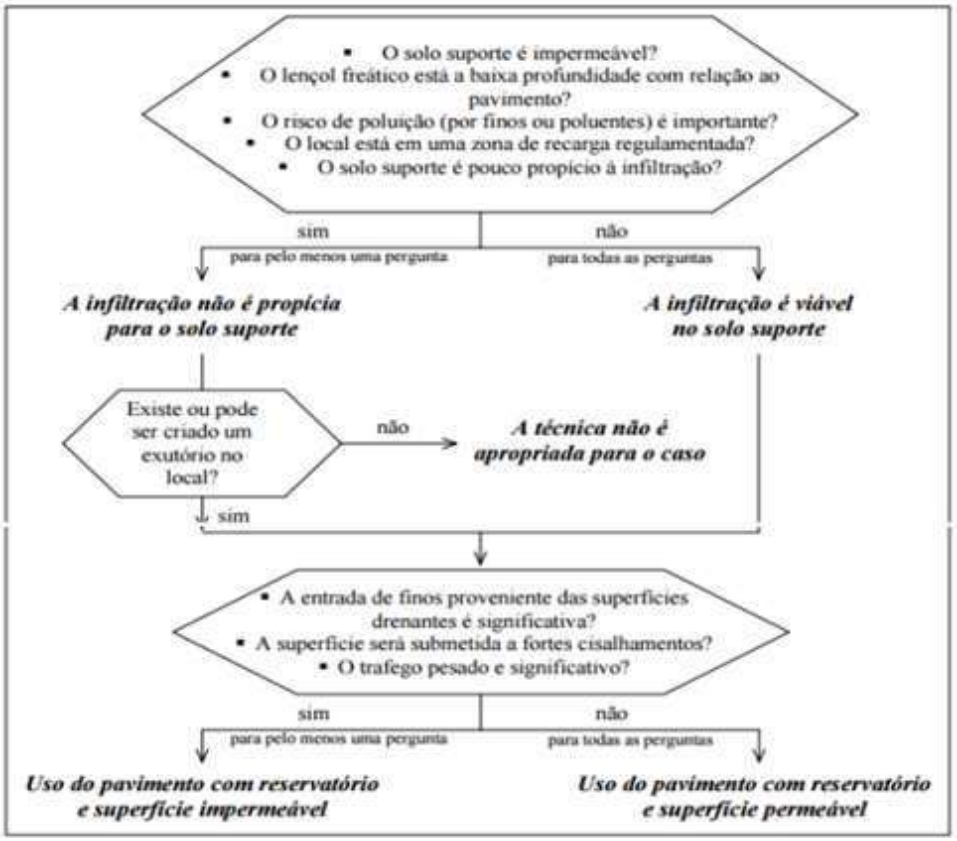
Com os efeitos da urbanização, houve alterações extremamente consideráveis nos sistemas de drenagem, ocupação do solo, mudança dos cursos d’agua, aterros que, consequentemente, impermeabilizam o solo. Para a construção de um pavimento permeável é recomendado seguir etapas tais como:

2.5.1.1 Análise de viabilidade técnica

Este tipo de estudo de viabilidade, permite analisar se o pavimento permeável é a melhor escolha para aplicação dele nas condições do local de implantação, assim permitindo definir diretrizes e parâmetros para o projeto a ser executado.

A figura 3 mostra um fluxograma para análise de viabilidade técnica, que tem como objetivo verificar as condições do solo, taxas de infiltração, particularidades do lençol freático e condições de cargas de finos.

Figura 3 - Fluxograma para análise de viabilidade



Fonte: Azzout (1994), apud Acioli (2005) p. 15

De acordo com Azzout (1994), o fluxograma seve para auxiliar na análise de viabilidade e na introdução de pavimentos permeáveis em solos com propriedades argilosas. Constata-se, também, que a série de questionamentos é um encaminhamento direto para o pavimento que cumpra todas as exigências de uso.

2.5.1.2 Verificações complementares

A análise geral do projeto inclui a identificação de áreas de implementação e contribuições existentes na área de implementação, como tais: se há presença de vegetação, rede para tratamento de água e esgoto, tráfego, condições de infiltração do solo, avaliação do solo, topografia e suas especificações.

As inspeções adicionais podem determinar algumas características como os aspectos hidrológicos, características do lençol freático, flutuações sazonais, a cota do lençol, assim como sua vulnerabilidade, propriedades qualitativas e geográficos do objeto da análise.

Na avaliação da área de drenagem, é necessário determinar a área de contribuição e sua taxa de impermeabilização para calcular a capacidade de armazenamento exigida pela estrutura.

Para avaliar a qualidade da água, suas áreas de drenagem devem ser determinadas. Se houver uma grande quantidade de finos ou matéria orgânica no efluente, um pré-tratamento deve ser feito para evitar o bloqueio rápido do pavimento (AZZOUT *et al*. 1994).

2.5.1.3 Materiais e camadas

O material utilizado para cada camada do pavimento deve ser selecionado de acordo com a espessura máxima aceitável da estrutura e os esforços mecânicos no qual o pavimento está submetido tecnicamente, levando-se em conta, também, os aspectos econômicos.

Para Acioli (2005), o material da camada superficial deve suportar as exigências de tráfego, como a deformação vertical, tensão de cisalhamento e permitir a penetração da água da chuva no caso de estradas de drenagem. O mesmo deve ser selecionado de acordo com seu uso e sua capacidade de penetração.

O pavimento permeável segue basicamente três tipos de superfícies para minimizar o escoamento superficial, sendo eles: o asfalto poroso, concreto poroso e blocos de concreto vazado. Conforme mostrado na figura 4.

Figura 4 - Exemplos de aplicação de alguns tipos de revestimentos permeáveis

(1) Pavimento poroso em asfalto; (2) Pavimento poroso em concreto; (3) Pavimento permeável com blocos pré-moldados de concreto.
Fonte: Acioli, (2005).

Na Figura 5, observa-se a comparação entre diferentes tipos de pavimentos permeáveis:

Figura 5 - Comparativo entre os tipos de matérias para a camada superficial

Critérios	Material				
	Solo natural	**Blocos vazados**	**Asfalto poroso**	**Concreto poroso**	**Revestimento impermeável**
Tipo de Uso*	Praças Estacionamentos Vias de pedestres Quadras esportivas	Praças Estacionamentos Vias de pedestres Calçadas	Todos os usos, desde que com estrutura reforçada	Todos os usos, desde que com estrutura reforçada	Todos os usos
Capacidade de absorção*	Varia de acordo com o material	Média	Boa	Boa	Nula
Aspecto visual*	Rústico	Bom, com possibilidade de variações de cores	Semelhante ao asfalto comum	Semelhante ao asfalto comum	
Periodicidade de manutenção*	6 meses	6 meses a 1 ano	Varia de acordo com o uso (6 meses a 2 anos)	6 meses a 2 anos	Depende do local
Custo de implantação*	Baixo	Alto	Médio	Médio	Médio
Custo de manutenção*	Médio	Alto	Médio a alto	Médio a alto	Baixo
Resistência / arrancamento*	Médio	Boa	Média	Média a boa	Boa
Aderência*	Baixa	Média	Muito boa	Boa	Boa
Acústica*	Ruim	Média	Boa	Boa	Média
Retenção de partículas sólidas**	NP	Muito boa	Muito boa	Muito boa	Muito boa
Retenção de metais pesados dissolvidos**	NP	Muito boa	Baixa	Muito boa	Baixa

*adaptado de Azzout et al 1994. **adaptado de Fach et al. 2002. NP**não pesquisado; na análise dos custos de implantação, manutenção, deve-se considerar a diferençados custos dos EUA e Europa, com relação ao Brasil.

Fonte: AZZOUT (1994).

• Camada base ou reservatório - A camada da base do pavimento permeável tem a função de transmitir ao solo de suporte as exigências impostas a camada superior, além de armazenar temporariamente a água da chuva até que ela penetre no solo. O material que constitui a camada da base deve ser selecionado de acordo com sua compatibilidade com a camada superficial, aspectos estruturais, porosidade e custo.

2.5.1.4 Reciclem do P.E.T

Polietileno Tereftalato, conhecido popularmente como P.E.T, é de suma importância para o mercado de embalagens, pois se trata de plástico de engenharia com um excelente desenho quanto a rigidez, tenacidade, alta resistência ao calor, estabilidade química e dimensional e capacidade de isolamento elétrico.

Uma característica desta atividade é a tendência ao crescimento do setor, uma vez que as necessidades de matérias primas derivadas do plástico vêm aumentando no Brasil. A reciclagem de plástico pós consumo pode ser uma oportunidade de negócios e a utilização do

material reciclado como matéria-prima de outros processos, permite a redução de custos nas empresas transformadoras (MANO, *et al*. 1995).

Um dos processos para ajudar na mistura do P.E.T na base é transformá-lo em *flake* (flocos) e pó.

Para chegar no material de pó de P.E.T. é preciso gerar o *flake*, parte da origem do processo de esmagamento das garradas P.E.T. A primeira etapa é remover rótulos e a parte superior onde fica a tampa, logo após são lavadas e colocadas em um moinho, onde ocorre o esmagamento, resultando no material de *flake*.

A próxima parte consiste em chegar no material de pó de P.E.T., necessitando de um tratamento térmico, a fim de diminuir seu volume, aumentando a sua densidade e, assim, o material encontra-se adequado para o próximo passo. Nesta parte ocorre a retomoldagem, em que o material é deixado em formato ideal para a moldagem do estágio final. Após o processo anterior, o material é novamente moído e deixado no formato de pastilhas pequenas. O último passo é a micronização, em que o material é micronizado com a finalidade de reduzir o material até virar um pó (MELO, 2004).

De acordo com ABIPET (2008), existem três tipos de reciclagens de P.E.T's que podem ser utilizadas:

- Reciclagem química: onde os elementos do P.E.T. são separados;
- Reciclagem energética: em que o calor pode gerar energia elétrica;
- Reciclagem mecânica: no qual ocorre o recolhimento do material já utilizado, e este é transformado em embalagens para produtos não alimentícios e outros fins.

Os produtos resultados da garrafa pet tem uma melhoria na sua performance, são modernos e de extrema leveza, além de redução dos custos e consumo de matérias primas não renováveis. No segmento de construção civil, esses produtos também, tem sido aceito, principalmente para confecção de telhas, muros e até paredes (CEMPRE, 2015).

2.5.1.5 Interfaces entre camadas

Para dificultar que o material migre de uma camada para outra, necessita-se a utilização de filtros geotêxtis ou geomembranas para fazer a interface entre elas. Segundo Raimbault (2002), os pavimentos permeáveis são denominados estruturas reservatórias, e essa dominância se refere à função desempenhada pela matriz porosa que é constituída por:

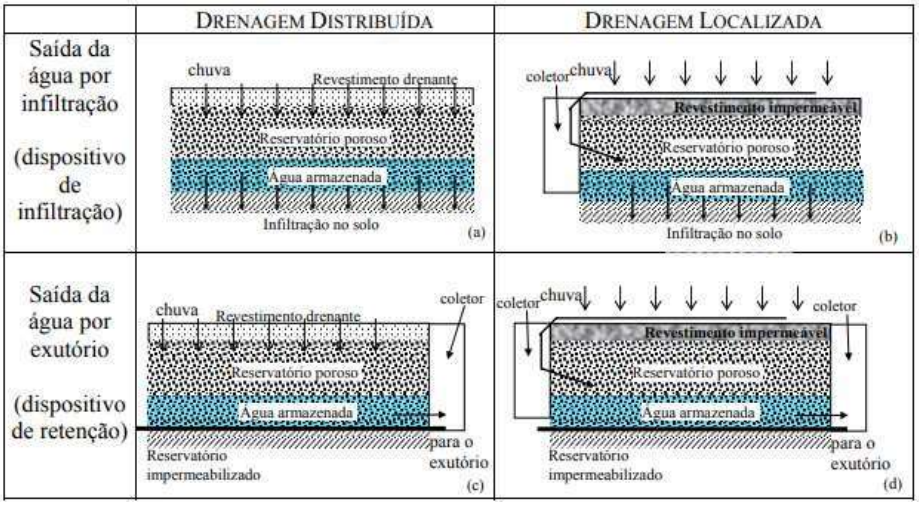
- Função mecânica: corresponde a estrutura que suporta as cargas dos veículos em tráfego;
- Função hidráulica: permite a retenção temporária das águas através da porosidade dos materiais, além da drenagem e infiltração no solo do subleito.

De acordo com Azzout (1994), a função hidráulica contextualizada anteriormente tem seu funcionamento baseado em:

- Admissão da água no corpo do pavimento – A admissão da água é feita de forma distribuída (caso de revestimentos porosos, que permitem a introdução da água) ou localizada (por entre drenos laterais ou bocas-de-lobo);
- Armazenamento Temporário – através de estocagem da água temporariamente no interior do pavimento, por meio de reservatório dimensionado;
- Escoamento – realizado através da infiltração do solo, devido a liberação na rede de drenagem ou combinação delas.

Segundo Azzout *et al*. (1996), o pavimento permeável pode ser dividido em quatro tipos, sendo capaz de possuir revestimento drenante ou impermeável, além disso ter a função de infiltração ou ainda somente de armazenamento. Na figura 6, demonstra-se os quatro tipos de pavimento com reservatório estrutural.

Figura 6 - Exemplos dos diferentes tipos de pavimento com reservatório estrutural



Fonte: Azzout *et al*. (1994).

O DNIT (2006), contextualiza que água por infiltração tem seu caminho traçado por drenagem profunda, tendo em vista a importância de uma drenagem adequada para que não ocorra efeitos danosos ao pavimento, como redução da capacidade de suporte do solo da

fundação. Entretanto, o pavimento com saída por exultórios, mantém a água armazenada sem reutilização para fins não-potáveis (PRATT, 1999).

2.6 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL

No dimensionamento de um pavimento flexível, segundo o SENSO (2007), deve-se determinar a espessura de suas camadas para que de fato possam resistir, transmitir e distribuir as pressões resultantes do tráfego de veículos no sub-leito. Logo, consequentemente, a seguir, mostram-se as seguintes etapas do método de dimensionamento do DNIT.

O manual de pavimentação do DNIT (2006), destaca que o dimensionamento é igualmente proporcional ao número equivalente de operações de eixo (N), durante o intervalo de tempo de projeto. Para verificar o volume médio de tráfego, utiliza-se a equação apresentada a seguir:

$$\text{Vm}= \frac{V_1[2+(\text{P-1})\text{t}/100]}{2} \quad (1)$$

Onde:

Vm – Volume médio de tráfego

V_1 – Volume médio diário de tráfego (anual)

P – Período

t - Taxa de crescimento anual (%)

Considerando uma taxa de crescimento anual no volume total de tráfego num certo período, temos:

$$Vt = \frac{365V_1(1+t\ /\ 100)^P - 1}{t\ /\ 100} \quad (2)$$

Onde:

Vt – Volume total de tráfego

V_1 – Volume médio diário de tráfego (anual)

t – Taxa de crescimento anual (%)

P – Período

Levando em conta o volume total de tráfego (Vt) calculado, determina-se o número equivalente de operações do eixo simples (N): Eixo simples padrão.

$$N = Vt \times (F.E) \times (F.C)(F.E) \times (F.C) = F.V \quad (3)$$

Onde:

N – Número de equivalências

Vt – Volume total de tráfego

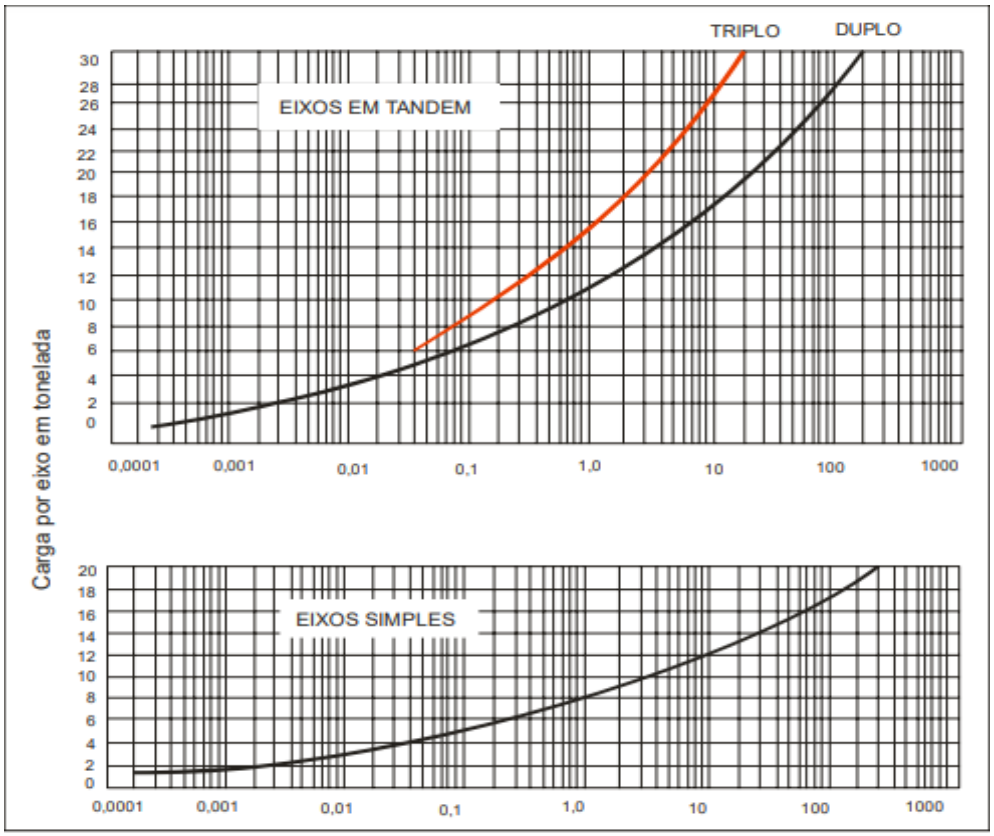
F.E – Fator de eixos

F.C – Fator de carga

F.V – Fator de veículo

Para concretizar o estudo de volume total de tráfego (Vt), faz-se necessário uma contagem de tráfego no percurso que está a considerar. Diante disso, é realizada a contagem do número total de eixos n e, pesam-se todos eles. As condições necessárias para cálculo dos fatores (F.E, F.C e F.V) são demonstrados na figura 7:

Figura 7 - Fatores de equivalência de operação



Fonte: Manual de Pavimentação, (DNIT, 2006).

Logo após a pesagem dos eixos, desenvolve-se o agrupamento dos diversos eixos por intervalo de carga, caracterizados pelo seu ponto central como é demonstrado na tabela a seguir:

Tabela 1 - Agrupamento de eixos e determinação do fator de operação.

(1)	(2)	(3)	(4)
	Porcentagem	Fator de equivalência	Fator de operação
Eixos Simples (t)			
Eixos tandem (t)			

Fonte: Manual de Pavimentação (DNIT, 2006).

Para a obtenção dos valores da coluna 3, utiliza-se a figura 7. Os valores de fator de operação, ou seja, coluna 4, são o produto dos valores da coluna 2 pelos da coluna 3. O resultado da coluna 4 é o produto 100 x (F.C), ou melhor, equivalência = 100 x (F.C). Onde:

$$F.C = \frac{Equivalência}{100} \quad (4)$$

Em relação a Espessura mínima do revestimento, utiliza-se revestimentos betuminosos, que tem a finalidade de proteger a camada de base dos esforços ocasionados pelo tráfego e para impossibilitar a ruptura do mesmo por forças tracionadas.

O manual de pavimentação do DNIT (2006), recomenda as espessuras demonstradas no Quadro 1. De forma específica, propõem-se o comportamento granular e defina-se as observações efetuadas.

Quadro 1 - Espessura mínima de revestimentos betuminosos.

N	**Espessura Mínima de Revestimentos Betuminosos**
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Manual de pavimentação (DNIT, 2006).

Na ocorrência de utilização de tratamentos superficiais, faz-se necessário bases granulares com alguma coesão, ao menos evidentes, em virtude à capilaridade ou entrosamento de partículas.

3 METODOLOGIA

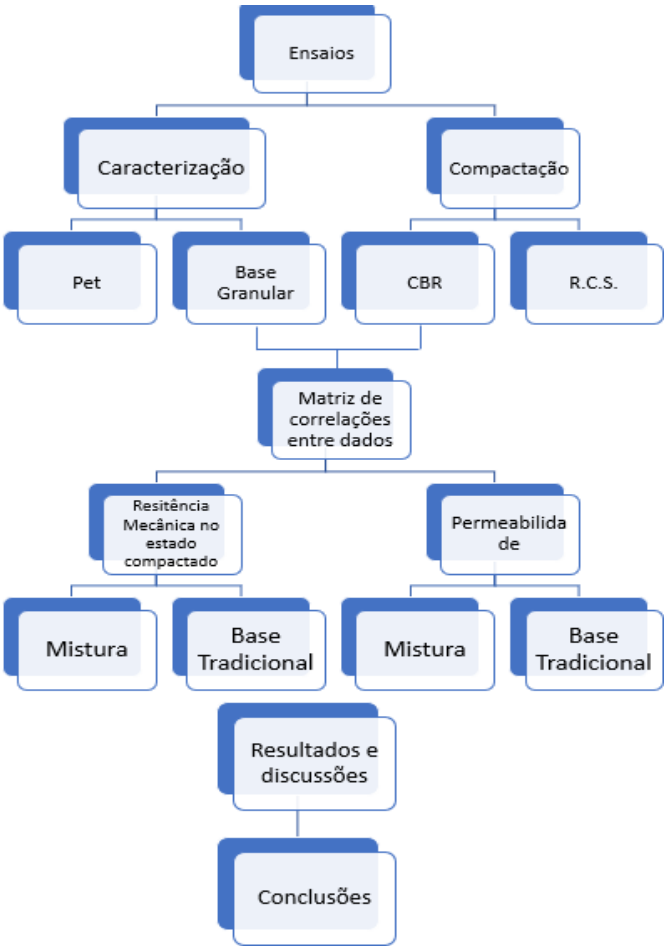
Neste item será estudado as características e propostas de acordo com o contexto.

3.1 CARACTERIZAÇÃO

Tendo em vista a falta de instruções de projeto e procedimentos construtivos específicos para a implantação de pavimentos permeáveis, este trabalho visa contribuir para o alcance desses objetivos ao propor diretrizes técnicas que possam ser sistematicamente utilizadas na implementação desses métodos de controle de escoamento superficial.

O fluxograma representado na figura 8 sintetiza a metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 8- Fluxograma do método a ser realizado



Fontes: Autores, (2020).

3.1.1 Descrição das etapas do trabalho

ENSAIOS: Propõe-se a realização de ensaios tradicionais de caracterização geotécnica, complementados pela realização de ensaios de compactação, CBR e RCS:

1. Caracterização do material: a caracterização será realizada a partir de ensaios tradicionais, com o intuito de qualificar as propriedades de cada material/camada utilizada nesta pesquisa;
2. Compactação do material: será efetuada com ensaios tradicionais e específicos a fim de verificar a estabilidade e suporte de camadas com intuito de prevenção e redução de adensamento do solo;
3. Estabelecer a matriz de analogia dos dados: a matriz de correlação será elaborada para verificar a intensidade das relações entre os fatores analisados, para averiguar o quanto uma variável é divergente da outra, para fim de verificação de permeabilidade e resistência dos materiais;
4. Resultados e discussões: Analisar e comparar os resultados obtidos a fim de reconhecer a qualidade da proposta estabelecida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

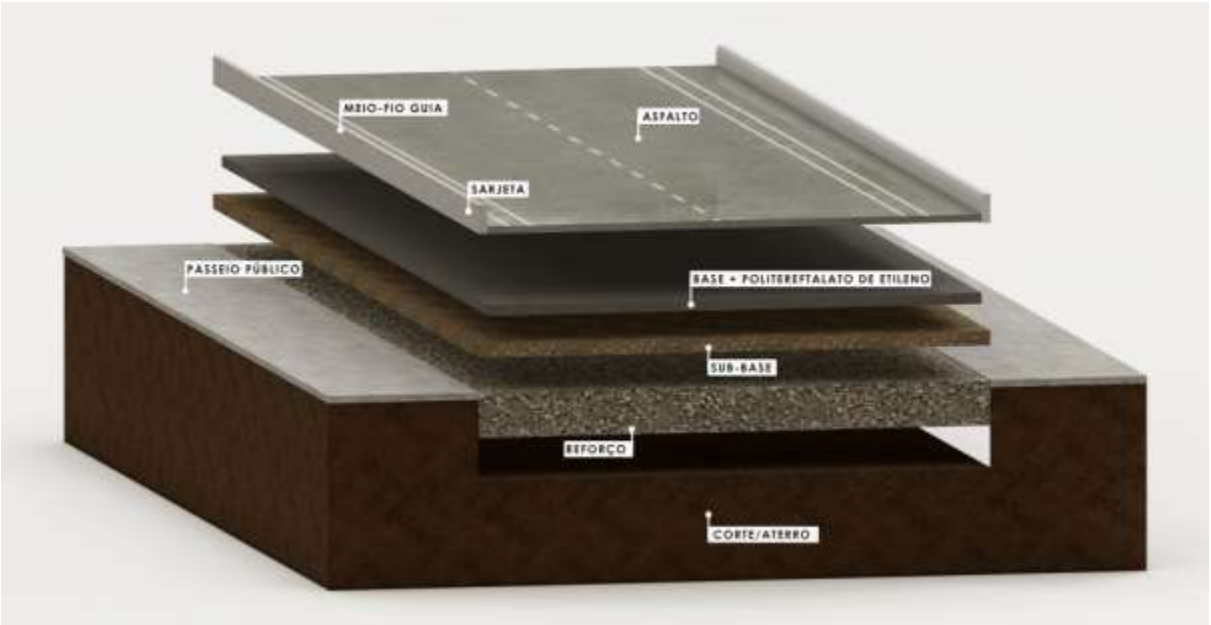
Este trabalho visa a comparação direta entre as propriedades da base granulometricamente estabilizada e seu comportamento com o acréscimo de resíduo. Ou seja, trará a análise e classificação da base, tanto pura, quanto com a mistura base/P.E.T com seus respectivos teores, para a compreensão do solo estudado e um possível ganho significativo em suas propriedades quando misturado.

Para fazer um comparativo deste estudo, foi realizado ensaios laboratoriais, no qual propõe comprovar a eficácia, permeabilidade e resistência para uma possível redução de extração de recursos naturais e estabelecer vantagens econômicas e sustentáveis, a fim de contribuir de forma clara e objetiva para o desenvolvimento da engenharia.

4.1 PROTÓTIPO

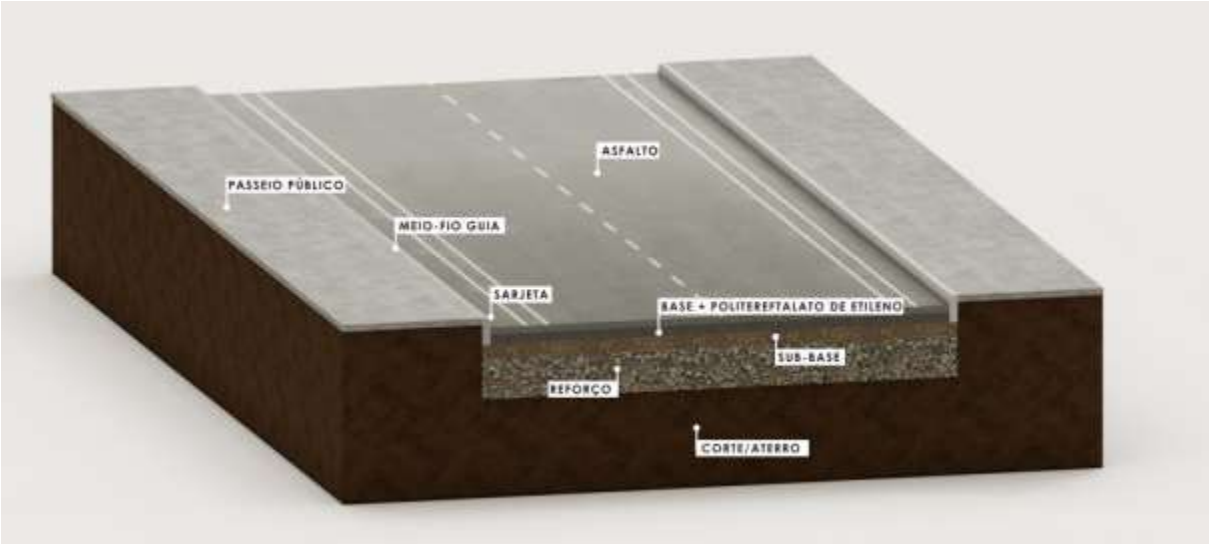
Objetivou-se com este trabalho, construir um protótipo de amostra do pavimento flexível agregada com a mistura. Na Figura 9 e 10, será apresentado um modelo de construção, o mesmo deve ser submetido a testes e estudos, para, então, dar origem a versão de fato, com locação e planejamento, até obter dados suficientes para a construção definitiva.

Figura 9 - Protótipo com modelo expandido



Fonte: Autores, (2021).

Figura 10 - Protótipo com modelo compactado



Fonte: Autores, (2021).

4.2 CARACTERÍSTICA DOS MATERIAIS

A ideia central é proposta em modificar a composição da base granular incorporando a mesma com fragmentos de P.E.T, triturados com teores estabelecidos em 5%, 10% e 15% de mistura.

4.2.1 Politereftalato de etileno – P.E.T

Tendo o petróleo como principal matéria-prima, o politereftalato de etileno – P.E.T, é um material utilizado para armazenar substâncias carbonadas e entre outras tantas. É um material fácil de ser encontrado e com um alto índice de não reaproveitamento após o uso do conteúdo interno, que ocasiona o descarte em locais inapropriados e, consequentemente, gera grave impacto ambiental, principalmente nas áreas marinhas e urbanas, considerando que levam anos até sua total decomposição (GALLI *et al*., 2012).

No método industrial de moagem do P.E.T., as cargas adentram no local onde serão desmanchados e, em seguida, são colocados em uma esteira de peneira rotativa em que todo o processo é monitorado, pois não pode haver a presença de outros materiais, como metais e P.V.C (detectados pela máquina). O material, já moído, logo é realocado e o líquido sujo, presente nos materiais, é separado e descartado. Imediatamente após o processo anterior, o material coletado é colocado em tanques para que ocorra a separação, caso ainda tenha algum insumo (como tampas e rótulos). Nesse momento, para melhor qualidade, podem ser acrescentados 62 produtos químicos caso seja necessário. Para obter a granulometria correta, é

preciso que ocorra a recolocação do P.E.T. em um outro tanque. Partindo desse processo, o material é movido até um local de lavagem e secagem. Por fim, o material é levado a um equipamento que detecta metais, onde é guardado e está pronto para ser a matéria-prima de muitas indústrias (ABIPET, 2012).

Existem estudos que destacam as vantagens sobre a resistência do material, tanto que o mesmo é utilizado de diversas formas na construção civil, visto que é de fácil acesso e tem um ótimo custo-benefício.

A mistura de resíduos de P.E.T., ocorre para a fabricação de tijolos maciços solo-cimento e, quando realizados o ensaio de compressão, foi observado um aumento de 163,15% no ganho de resistência – comparado com o traço padrão sem a incorporação do P.E.T., e a absorção de água foi respeitada, mantendo-se de acordo com a norma (SENA *et al*., 2017).

A Figura 11 mostra o material doado pela Artplast Industria e Comércio de Plásticos, da região de São Ludgero – SC, para os estudos propostos.

Figura 11 - Pó de PET

Fonte: Autores (2021).

4.2.2 Base granular/Análise de dados

A base granular foi cedida para estudos por uma pedreira da região do sul de Santa Catarina, do qual a mesma realizou ensaios específicos para estabelecer uma faixa de trabalho, seguindo as especificações do DEINFRA.

Referente aos valores recebidos e analisados com a execução dos ensaios, descreve-se uma conjuntura:

- O ensaio de **Granulometria** é constituído por um material Pétreo composto por 42% de brita ¾, 16% de pedriscos e 42% de pó de pedra.

No quadro 2, observa-se que a composição granulométrica se enquadrou no limite descrito pela faixa do DEINFRA.

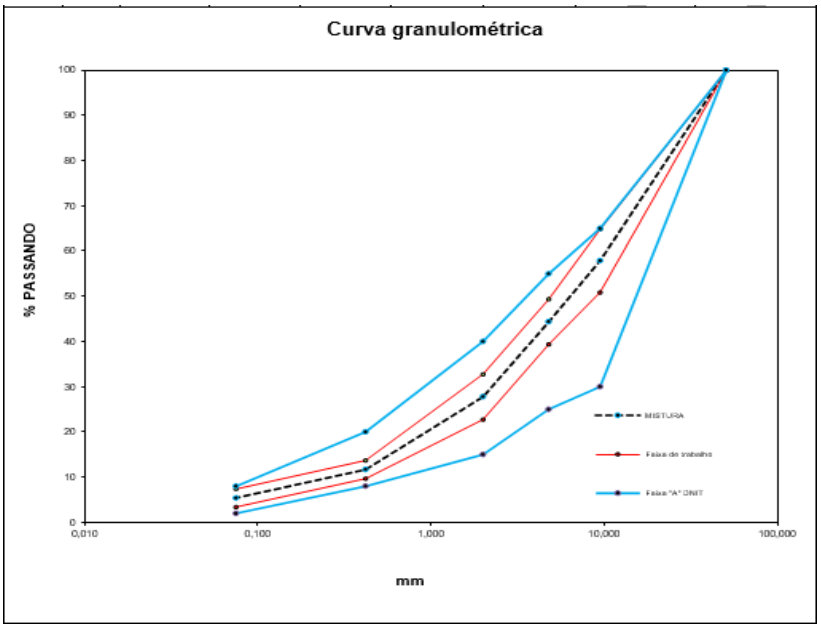
Quadro 2 - Granulometria da base

Agregados lavada (%p)					**Composição (%p)**			
Peneiras		Brita 3/4	Pedrisco	Pó de pedra	Mistura	Tolerância	Faixa de trabalho	Faixa “A” DNIT
ASTM	mm	42,0%	16,0%	42,0%	100,0%			
2"	50,8	100,0	100,0	100,0	100,0	+/- 7	100,0 -100,0	100 - 100
3/8"	9,5	1,7	94,8	100,0	57,9	+/- 7	50,9 - 64,9	30,0 - 65,0
n°4	4,8	1,6	11,7	99,6	44,4	+/- 5	39,4 - 49,4	25,0 - 55,0
n°10	2,0	1,4	4,8	62,8	27,8	+/- 5	22,8 - 32,8	15,0 - 40,0
n°40	0,42	1,3	4,4	24,8	11,7	+/- 2	9,7 -13,7	8,0 - 20,0
n°200	0,075	1,2	3,6	10,3	5,4	+/- 2	3,4 - 7,4	2,0 - 8,0

Fonte: Pedreira da Região Sul, (2021).

A figura 12, mostra perfeitamente onde a base se condiz na curva granulométrica, comprovando que a mesma está na Faixa “A” do DNIT.

Figura 12 - Curva granulometria da base granular



Fonte: Pedreira da Região Sul, (2021).

- Ensaio de compactação é onde se encontra a umidade ótima.

No quadro 3, é possível observar os valores dos pesos específicos secos e os teores de umidade correspondentes.

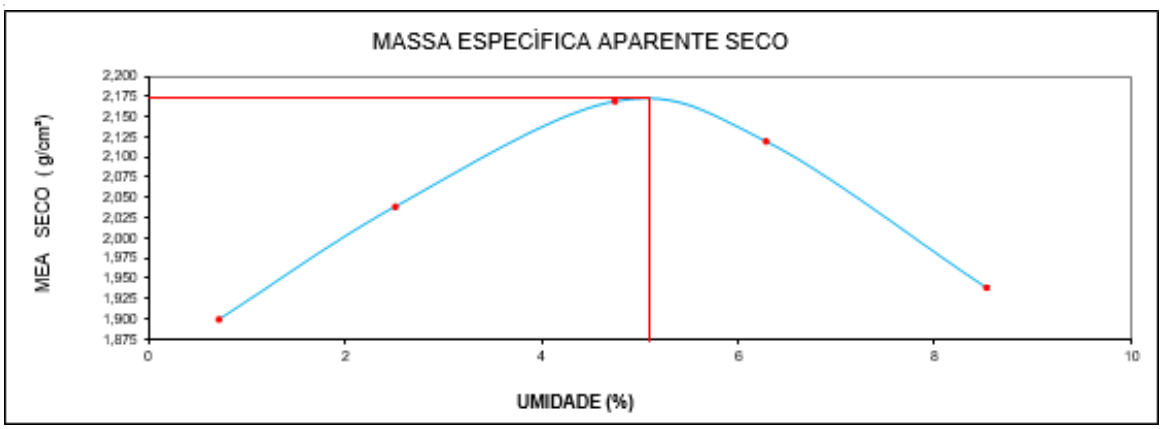
Quadro 3 - Massa específica aparente seco

Massa especifica aparente seco					
Número do molde	1	11	7	8	2
Solo úmido (g)	8731	9750	8775	8777	8499
Peso do molde (g)	4761	5373	4035	4055	4118
Volume do molde (cm²)	2075	2094	2086	2096	2082
Massa esp. Aparente do solo úmido (g/ cm²)	1,913	2,090	2,272	2,253	2,104
Massa esp. Aparente do solo seco (g/ cm²)	1,900	2,039	2,169	2,120	1,939
Número da cápsula	10	14	7	8	9
Solo úmido (g)	144,1	152,5	151,6	167,5	148,0
Solo seco + cápsula (g)	143,2	149,1	145,4	158,4	137,6
Peso da cápsula (g)	17,0	13,6	14,7	13,6	15,7
Umidade (%)	0,7	2,5	4,7	6,3	8,5

Fonte: Pedreira da região sul, (2021).

A figura 13, mostra o peso específico seco e a ordenada máxima da curva de compactação. A umidade é o teor de umidade correspondente ao peso específico máximo, as curvas de saturação estão relacionadas ao peso específico seco com a umidade, em função do grau da saturação, no qual é possível ver que a umidade ótima ficou em 5,1%.

Figura 13- Massa específica aparente seca x umidade ótima



Fonte: Pedreira da região sul, (2021).

- CBR – Índice de suporte Califórnia de forma breve consiste no ensaio de testar a resistência por meio da expansão e penetração.

Sobre a expansão, o quadro 4 mostra o relatório de informações da leitura do relógio comparador (deflectômetro), provenientes das atuações das cargas.

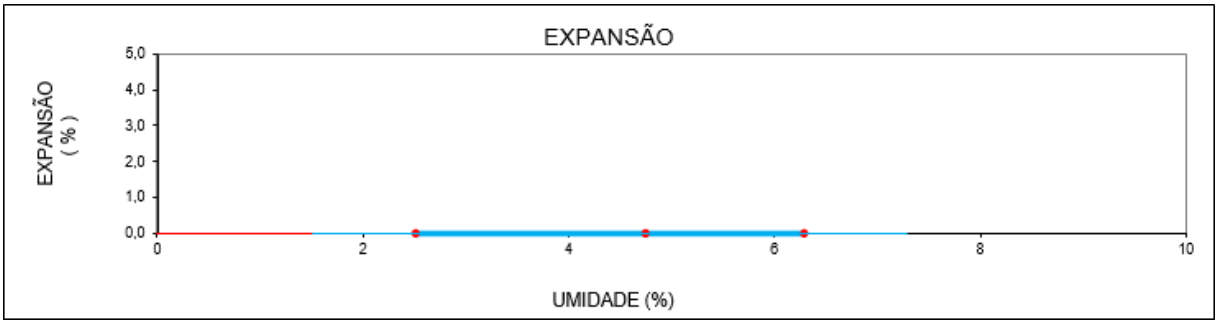
Quadro 4 - Relatório de expansão

EXPANSÃO										
Data	Hora	MOLDE Nº 11			MOLDE Nº 7			MOLDE Nº 8		
		Altura (mm) = 115,00			Altura (mm) = 115,00			Altura (mm) = 115,00		
		Leitura (mm)	Diferença (mm)	EXP (%)	Leitura (mm)	Diferença (mm)	EXP (%)	Leitura (mm)	Diferença (mm)	EXP (%)
11/01/2018	09:40	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
12/01/2018	09:42	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
13/01/2018	09:41	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
14/01/2018	09:40	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
15/01/2018	09:40	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00

Fonte: Pedreira da região sul, (2021).

A figura 14 mostra a curva de expansão, onde fica nítido que a base granular tem 0% de expansão.

Figura 14 - Curva CBR e sua expansão



Fonte: Pedreira da região sul, (2021).

Logo, o ensaio de penetração condiz em mostrar a determinação da resistência do solo a penetração estática e contínua, caracterizada em componentes de resistência de ponta e de atrito lateral local seguindo a NBR 9850.

A figura 15 a seguir, mostra os resultados obtidos no ensaio CBR, os quais foram obtidos através da penetração de três corpos de prova da base granular da pedreira.

Figura 15 - Leitura do CBR

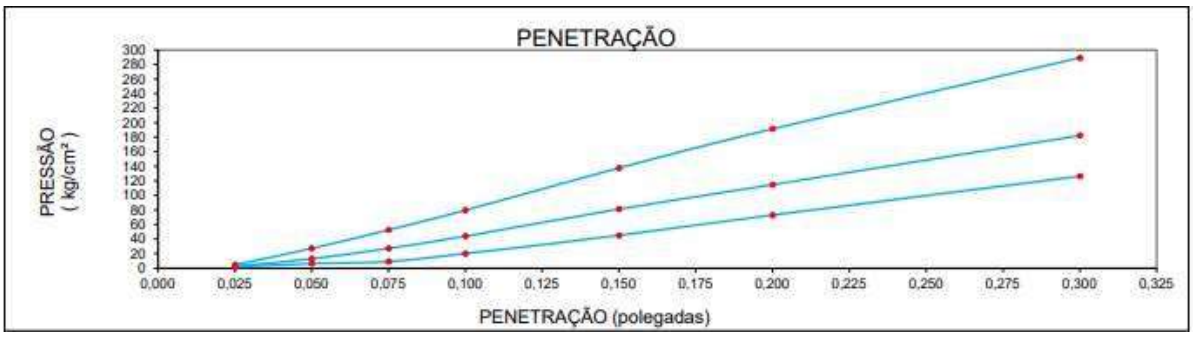
PENETRAÇÃO																
TEMPO EM MINUTOS	PENETRAÇÃO		PRESSÃO PADRÃO	MOLDE NÚMERO			11	MOLDE NÚMERO			7	MOLDE NÚMERO			8
				LEITURA	PRESSÃO (kg/cm²)		ISC	LEITURA	PRESSÃO (kg/cm²)		ISC	LEITURA	PRESSÃO (kg/cm²)		ISC
	mm	Pol	(kg/cm²)	(mm)	CALCULADA	CORRIGIDA	(%)	(mm)	CALCULADA	CORRIGIDA	(%)	(mm)	CALCULADA	CORRIGIDA	(%)
0,5	0,63	0,025		29	2,8			49	4,8			15	1,5		
1,0	1,27	0,050		133	13,0			279	27,2			66	6,4		
1,5	1,90	0,075		280	27,3			540	52,7			95	9,3		
2,0	2,54	0,100	70	453	44,2		**63,1**	818	79,8		**114,0**	206	20,1		**28,7**
3,0	3,81	0,150		833	81,2			1413	137,8			463	45,2		
4,0	5,08	0,200	105	1178	114,9		**109,4**	1966	191,7		**182,6**	750	73,1		**69,7**
6,0	7,62	0,300	132	1872	182,6			2966	289,2			1297	126,5		
8,0	10,16	0,400	161												
10,0	12,70	0,500	182												

Fonte: Pedreira da região sul, (2021).

Na figura anterior, percebe-se que não foi calculada a pressão corrigida, portanto, utilizou-se da pressão calculada para a obtenção dos cálculos finais, onde os determinantes máximos do Índice de Suporte Califórnia (ISC) para os moldes 11, 7 e 8 são, respectivamente, 109,4; 182,6 e 69,7.

Já na figura 16, ilustra três pontos de retas crescentes de pressão-penetração obtidos a partir do quadro ilustrado na figura 15, calculados para três corpos de prova ensaiados.

Figura 16 - Gráfico da relação pressão x penetração do CBR



Fonte: Pedreira da região sul, (2021).

- Ensaio de Permeabilidade é a propriedade que facilita ou dificulta o escoamento da água através de um solo.

A partir dos dados fornecidos pela pedreira, foi realizado o ensaio de permeabilidade. A figura 17 demonstra como foi preparado a parte de vedação a qual foi realizada com argila plástica (bentonita).

Figura 17 - Demonstração da vedação do ensaio de permeabilidade

Fonte: Autores, (2021).

Após a moldagem do corpo de prova compactado, tira-se as medidas do mesmo, sendo 12,5 cm de altura e um diâmetro de 9,5 cm. Com as medidas retiradas, pode-se obter a área total, a qual este tem 514,82cm².

Posteriormente, para a realização deste ensaio, coloca-se o molde no sistema de aplicação, o qual se conecta a uma bureta de vidro graduada, a qual tem uma área de 768 cm².

No quadro 5, tem-se as leituras realizadas como carga hidráulica e tempo.

Quadro 5 - Leitura do ensaio de permeabilidade da base

Carga hidráulica (cm)	Tempo (s)
0 cm	291s
52,5 cm	600s
42,4 cm	600s
35,2cm	600s

Fonte: Autores (2021).

Após a leitura dos dados, determina-se o coeficiente de permeabilidade, o qual é calculado em vista a Lei de Darcy, onde o fator *k* é, resumidamente, o valor que representa a velocidade com que a água atravessa uma amostra, sendo calculado pela equação 5.

$$k = \frac{a \times H}{\cancel{A \times \Delta t}} \times In \times \left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (5)$$

Onde:

k = Coeficiente de permeabilidade (cm/s)

a = Área da bureta (cm^2)

H = Altura do corpo de prova (cm)

A = Área do corpo de prova (cm^2)

Δt = Diferença entre t_1 e t_2 (s)

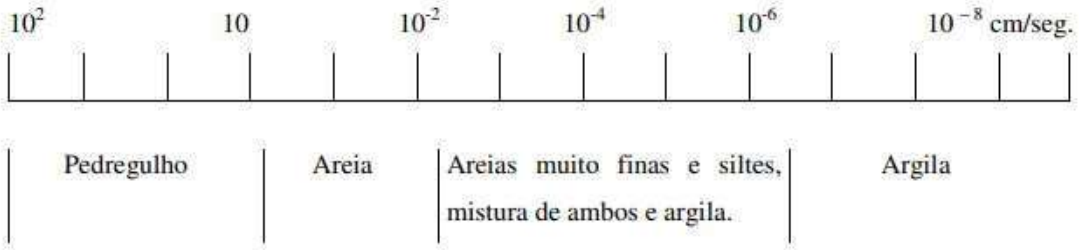
h_1 = Carga hidráulica no instante t_1 (cm)

h_2 = Carga hidráulica no instante t_2 (cm)

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade, foi utilizado as leituras demonstradas no quadro 5, onde utilizou-se para h1 52,5 cm, h2 35,2 cm e 600s para a diferença de tempo.

O resultado obtido para o coeficiente de permeabilidade, chegou no valor de $1{,}24x10^{-2}$cm/s. A figura 18 apresenta a classificação de Casagrande, onde traz a permeabilidade como uma estimativa de ordem de grandeza, relacionando-a com a granulometria do material.

Figura 18 - Classificação Casagrande



Fonte: CAPUTO, (1998).

Portanto, classifica-se a ordem de 10^{-2} como areia, que se relaciona diretamente com sua granulometria, onde o material foi passado na peneira 4,75mm. Enfim, conclui-se, com os resultados analisados e obtidos, que a brita graduada simples atende todas as especificações das normas vigentes.

4.3 SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto é desenvolver traço na mistura base/PET, de forma a alterar suas condicionantes de permeabilidade, mantendo-a dentro das especificações do DEINFRA. Ou seja, nada mais é que a introdução de pó de P.E.T na camada base da estrutura do pavimento

flexível, cujo sistema alternado deve manter ou aprimorar os comportamentos geomêcanicos do material como elementos de resistência e capacidade de utilização.

Para a análise do mesmo, foi estabelecido índices de mistura no qual ficou constituído em 5%,10% e 15% de mistura de P.E.T na base e suas quantidades por teores. A partir destes índices foram estabelecidos os seguintes ensaios para comprovação de sua funcionabilidade:

- Compactação – Um ensaio por teor;
- CBR e Expansão – Um ensaio por teor;
- Permeabilidade – Um ensaio por teor;
- Resistência a compressão simples – Variável em função da confiabilidade, que ficou estabelecida em 13 amostras por teor.

4.3.1 Caracterização da proposta

Após estabelecido o sistema proposto, inicia-se o processo de execução dos ensaios no laboratório, a fim de comprovar as metodologias estabelecidas.

4.3.2 Ensaios

Neste item, será descrito todos os ensaios realizados e seus resultados para obtenção da análise final.

- **Ensaio de compactação**

Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7182 e, a partir deste, foi extraído os segmentos utilizados para os teores. Inicialmente, foi feito uma seleção da base granular através da peneira 4,75mm. Assim, o material passante foi utilizado para a mistura, para, enfim, formar a curva de compactação e encontrar a umidade ótima da mesma.

Logo após, estimou-se um teor de umidade baseado na base granular para a realização do ensaio de compactação e, assim, optou-se por 4,5% de umidade. Desta forma, foi utilizado 180g de água para cada ponto. Em seguida será descrito os resultados para cada teor de mistura.

- **Teor de 5%**

Para o teor de 5%, utilizou-se 3.750g de base granular e 250g de pó de *flake*. Após a separação destes materiais, inicia-se a mistura dos mesmos até a homogeneização total. Em seguida, foi moldado em 3 camadas o corpo de prova, o qual tem os seguintes dados demonstrados no quadro 6.

Quadro 6 - Dados do corpo de prova do teor de 5%

DADOS DO CORPO DE PROVA	
Cilindro nº	1
Peso da amostra total (gf)	4000,00
Volume do cilindro (cm³)	997,50
Peso do cilindro (gf)	4645,00
Número de golpes por camada	26

Fonte: Autores (2021).

O traçado do ensaio foi repetido cinco vezes, de forma que dois deles se encontrem no ramo ascendente, um próximo a umidade ótima e outros dois no ramo descendente da curva, gerando, para cada um deles, a massa específica aparente seca e o teor de umidade, onde para a determinação dos mesmos utiliza-se as equações 6 e 7 a seguir.

$$\rho_d = \frac{M_u \times 100}{V(100 + w)} \tag{6}$$

Onde:

ρ_d = Massa especifica aparentemente seca (g/cm³)

M_u = Massa úmida do solo compactado (g)

V = Volume útil do cilindro (cm³)

w = Teor de umidade do solo compactado (%)

$$w = \left(\frac{P_{água}}{P_{seco}}\right) \times 100 \tag{7}$$

Onde:

w = Teor de umidade do solo compactado (%)

$P_{água}$ = Peso da água (gf)

P_{seco} = Peso do solo seco (gf)

Após a obtenção dos resultados das equações anteriores, inicia-se a formatação do quadro a seguir, onde encontra-se os dados obtidos através dos ensaios e precedente cálculos.

Quadro 7 - Dados do ensaio de compactação o teor de 5%

Dados para curva de compactação					
Peso do Cilindro + Solo (gf)	6495,0	6700,0	6745,0	6735,0	6635,0
Peso da Amostra Úmida (gf)	1850	2055	2100	2090	1990
Peso Específico Aparente Úmido (gf/cm3)	1,855	2,060	2,105	2,095	1,995
Cápsula n°	A-50	A-154	81	A-120	A-06
Peso da Cápsula(gf)	15,82	16,01	27,41	15,39	23,96
Peso da Cápsula + Solo Úmido (gf)	74,04	99,68	110,55	74,61	104,41
Peso da Cápsula + Solo Seco (gf)	69,64	90,93	101,56	67,57	91,77
Peso da Água (gf)	4,40	8,75	8,99	7,04	12,64
Peso do Solo Seco (gf)	53,82	74,92	74,15	52,18	67,81
Teor de Umidade (%)	8,18	11,68	12,12	13,49	18,64
Peso Específico Aparente Seco (gf/cm3)	1,7145	1,8447	1,8776	1,8462	1,6815

Fonte: Autores, (2021).

Posteriormente utilizando as coordenas cartesianas, traça-se a curva de compactação, marcando-se nas abscissas, os teores de umidade (w) e, em ordenadas, as massas especificas aparentes secas (ρ_d) correspondentes. Assim, encontra-se, também, a umidade ótima, que é onde tem o ponto de massa específica aparente seca máxima. Esta curva se encontra na Figura 19.

Figura 19 - Curva de compactação do teor 5%

Fonte: Autores, (2021).

Para uma melhor análise, foi utilizado a curva de tendência vermelha, demonstrada na figura 15, onde a umidade ótima da mistura ficou em 12,1%.

- **Teor em 10%**

Neste teor, utilizou-se 3.500g de base granular e 500g de pó de flake, logo em seguida após sua homogeneização foi moldado o corpo de prova seguindo os dados demostrados no quadro 8.

Quadro 8 - Dados do corpo de prova do teor de 10%

DADOS DO CORPO DE PROVA	
Cilindro nº	2
Peso da amostra total (gf)	4000,00
Volume do cilindro (cm³)	1009,50
Peso do cilindro (gf)	3500,00
Número de golpes por camada	26

Fonte: Autores, (2021).

Para encontrar a massa especifica aparente seca, foi utilizada a Equação 6 e, para o teor de umidade, foi empregado a Equação 7. A obtenção dos resultados, apresenta-se no quadro 9.

Quadro 9 – Dados do ensaio de compactação do teor de 10%

Dados para curva de compactação					
Peso do Cilindro + Solo (gf)	5382,0	5480,0	5485,0	5315,0	5290,0
Peso da Amostra Úmida (gf)	1880	1980	1985	1815	1790
Peso Específico Aparente Úmido (gf/cm3)	1,862	1,961	1,966	1,798	1,773
Cápsula n°	24	A-58	A-11	A-127	A-140
Peso da Cápsula(gf)	17,38	22,64	14,65	15,57	19,54
Peso da Cápsula + Solo Úmido (gf)	74,73	81,82	63,20	82,79	79,73
Peso da Cápsula + Solo Seco (gf)	67,80	74,24	56,55	71,70	68,89
Peso da Água (gf)	6,93	7,58	6,65	11,09	10,84
Peso do Solo Seco (gf)	50,42	51,60	41,90	56,13	49,35
Teor de Umidade (%)	13,74	14,69	15,87	19,76	21,97
Peso Específico Aparente Seco (gf/cm3)	1,6373	1,7101	1,6970	1,5013	1,4538

Fonte: Autores, (2021).

Posteriormente utilizando as coordenas cartesianas, traça-se a curva de compactação, como demonstrado na figura 20 a seguir.

Figura 20 - Curva de compactação teor 10%

Fonte: Autores (2021).

Como no teor anterior, foi, também, utilizado neste a curva de tendência vermelha demonstrada na figura 18, onde a umidade ótima da mistura ficou em 15,5%.

- **Teor em 15%**

No teor de 15%, foram utilizados 3.250g de base granular e 750g de pó de *flake*, onde após sua mistura total, molda-se o corpo de prova com os seguintes dados demonstrados no quadro 10 a seguir.

Quadro 10 - Dados do corpo de prova do teor de 15%

DADOS DO CORPO DE PROVA	
Cilindro nº	1
Peso da amostra total (gf)	4000,00
Volume do cilindro (cm³)	997,45
Peso do cilindro (gf)	4645,00
Número de golpes por camada	26

Fonte: Autores, (2021).

Para encontrar a massa especifica aparente seca, foi utilizada a Equação 6 e, o teor de umidade, foi calculado pela Equação 7. Os dados obtidos encontram-se no quadro 11.

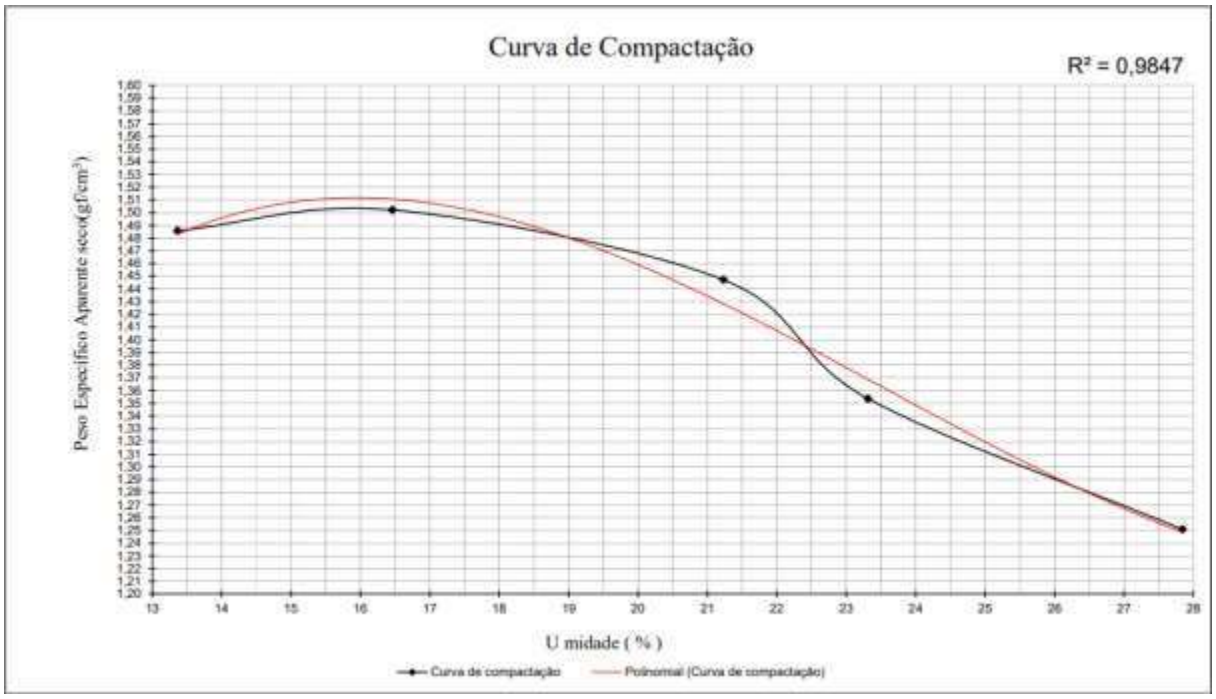
Quadro 11 - Dados para curva de compactação do teor de 15%

Dados para curva de compactação					
Peso do Cilindro + Solo (gf)	6325,0	6390,0	6395,0	6310,0	6240
Peso da Amostra Úmida (gf)	1680	1745	1750	1665	1595
Peso Específico Aparente Úmido (gf/cm3)	1,684	1,749	1,754	1,669	1,599
Cápsula n°	A-68	62	A-111	10	A-94
Peso da Cápsula(gf)	23,38	15,44	15,76	16,30	20,06
Peso da Cápsula + Solo Úmido (gf)	101,42	70,55	78,57	76,18	86,09
Peso da Cápsula + Solo Seco (gf)	92,22	62,76	67,57	64,86	71,71
Peso da Água (gf)	9,20	7,79	11,00	11,32	14,38
Peso do Solo Seco (gf)	68,84	47,32	51,81	18,56	51,65
Teor de Umidade (%)	13,36	16,46	21,23	23,31	27,84
Peso Específico Aparente Seco (gf/cm3)	1,4857	1,5022	1,4472	1,3537	1,2508

Fonte: Autores (2021).

A curva de compactação na figura 21, foi traçada de acordo com os resultados de peso específico aparente seco e teor de umidade do quadro 11.

Figura 21 - Curva de compactação teor 15%



Fonte: Autores, (2021).

Após analisar a curva de tendência vermelha demonstrada na figura 21, nota-se que a umidade ótima ficou em 16,9%.

Posteriormente a obtenção destes dados, iniciou-se a moldagem do CBR para cada teor.

- O ensaio de CBR - Índice de suporte Califórnia foi efetivado de acordo com a NBR 9895 da norma Brasileira, onde especifica o método de determinação do índice e expansão e penetração do solo.

Todo processo é realizado em três fases. A primeira é a compactação do solo com a sua umidade ótima, onde é empregado 5 Kg de material passado pela peneira 4,75 mm, compactado em 5 camadas de 12 golpes cada uma com energia padrão. A segunda consiste em após a moldagem do corpo de prova, o mesmo é imergido em água por, no mínimo, quatro dias, devendo ser realizada leituras no extensômetro a cada 24 horas, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Corpos de prova em imersão com o extensômetro

Fonte: Autores (2021).

Para o cálculo de expansão, utiliza-se a Equação 8.

$$Exp.(\%) = \frac{leitura\ final - leitura\ inicial\ do\ relógio\ comparador\ (deflectômetro)}{altura\ inicial\ do\ corpo\ de\ prova} \quad (8)$$

Na terceira e última fase, retira-se o corpo de prova da imersão e o deixa drenando por 15 minutos. Em seguida, leva-se o mesmo para prensa e retira-se os valores necessários para o cálculo das pressões de cada penetração, como demonstra a Figura 23.

Figura 23 - Prensa de CBR

Fonte: Autores, (2021).

Para o cálculo de Índice de Suporte Califórnia utiliza-se a equação 9 a seguir.

$$ISC = \frac{pressão\ calculada\ ou\ pressão\ corrigida}{pressão - padrão}\ x\ 100 \quad (9)$$

Após a obtenção dos dados, realiza-se o relatório para a obtenção do gráfico de expansão e penetração.

- Expansão com **teor de 5%**

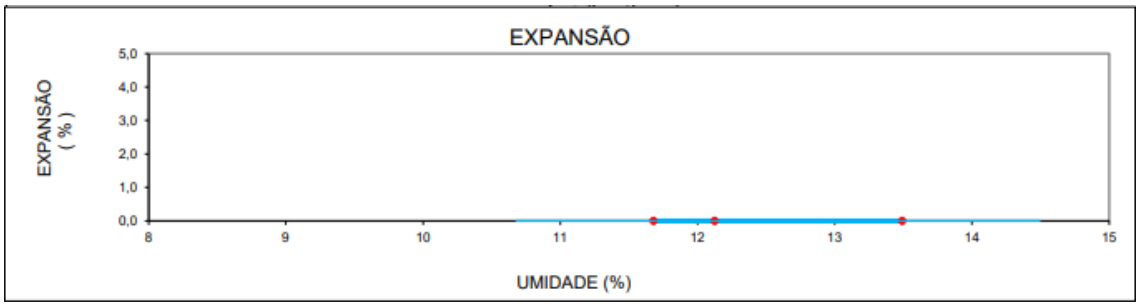
Para este ensaio, foi usado 4.750 Kg de base granular e 250 g de pó de *flake* para a elaboração da mistura e com a umidade ótima estabelecida na curva de compactação em 12,1%. A quantidade de água usada foi 605 g, obtendo-se, assim, o relatório de expansão como mostra o quadro 12 e o gráfico conforme a figura 24.

Quadro 12 - Relatório de expansão do teor de 5%

EXPANSÃO				
Data	Hora	MOLDE Nº 12		
		Leitura (mm)	Diferença (mm)	Exp (%)
22/04/2021	09:56	0,00	0,00	0,00
23/04/2021	10:00	0,00	0,00	0,00
27/04/2021	09:50	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autores, (2021).

Figura 24 - Gráfico de expansão do teor 5%



Fonte: Autores, (2021).

Após a análise dos resultados do quadro e da figura demonstrados anteriormente, compreende-se que a expansão da mistura ficou em 0%.

- Expansão com **teor de 10%**

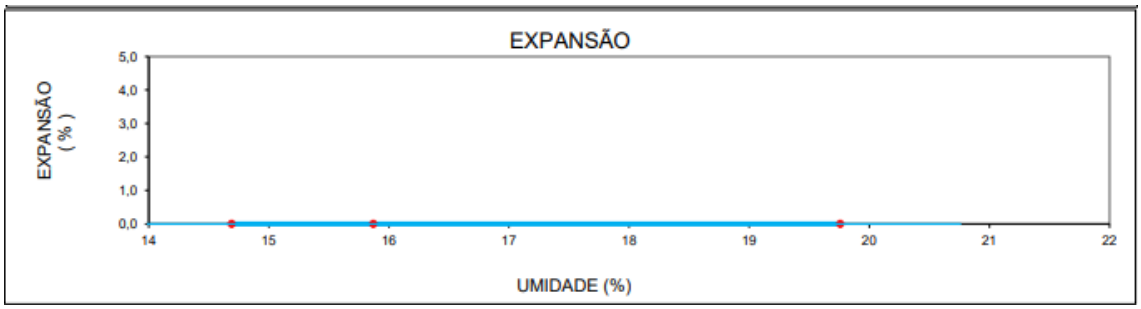
Foi usado 4.500 kg de base granular e 500 g de pó de *flake* para a elaboração da mistura e com a umidade ótima em 15,5%. A quantidade de água estabelecida foi 775 g, o relatório de expansão, encontra-se no quadro 13 e o gráfico conforme a figura 25 mostra que a expansão da mistura ficou em 0%.

Quadro 13 - Relatório de expansão do teor de 10%

EXPANSÃO				
Data	Hora	MOLDE Nº 7		
		Leitura (mm)	Diferença (mm)	Exp (%)
22/04/2021	09:56	0,00	0,00	0,00
23/04/2021	10:00	0,00	0,00	0,00
27/04/2021	09:50	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autores, (2021)

Figura 25 - Gráfico de expansão do teor 10%



Fonte: Autores, (2021)

Na figura anterior, entende-se que a expansão da mistura ficou em 0%.

- Expansão com **teor de 15%**

Foi usado 4.250 Kg de base granular e 750 g de pó de flake e com sua umidade ótima em 16,9%. A quantidade de água usada foi 845 g, porém a consistência não criou aderência devido a quantidade de água estabelecida pela umidade ótima. Deste modo, a base ficou totalmente saturada e não conseguiu uma compactação como demonstrado na Figura 26. Logo, o ensaio de penetração também não foi estabelecido pelos motivos eminentes.

Figura 26 – Mistura do teor de 15% saturada

Fonte: Autores, (2021)

Para o ensaio de **penetração**, após a drenagem de 15 minutos, o corpo de prova está pronto. Desse modo, o corpo é levado a prensa para fazer o assentamento do pistão de penetração por meio da aplicação da carga de aproximadamente 45N, controlada pelo deslocamento da ponteira do deflectômetro, então zera-se o mesmo e o medidor. Em seguida, aciona-se a manivela da prensa com a velocidade de 1,27 mm/min, cada leitura considerada é função de uma penetração do pistão no solo e de um tempo específico.

- Penetração com **teor de 5%**

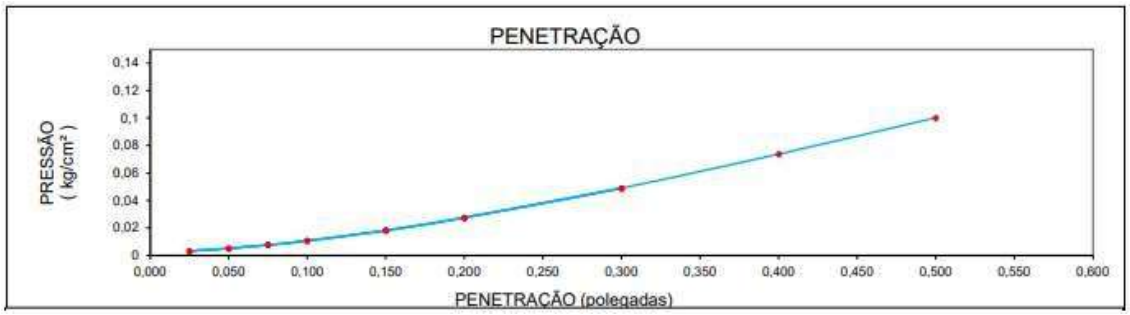
A leitura deflectômetro é indicada no Quadro 14. Através da Figura 27 é possível observar a correspondente tensão em função da leitura, no qual mostra a curva ascendente correspondendo ao material principal a base granular.

Quadro 14 - Leituras do relógio comparador para o teor 5%

PENETRAÇÃO							
Tempo em minutos	Penetração		Pressão padrão (kg/cm²)	MOLDE Nº 12			
				Leitura (mm)	Pressão (kg/cm²)		ISC (%)
	mm	Pol			Calculada	Corrigida	
0,5	0,63	0,025		0	0,0		
1,0	1,27	0,050		0	0,0		
1,5	1,90	0,075		0	0,0		
2,0	2,54	0,100	70	0	0,0		0,0
3,0	3,81	0,150		0	0,0		
4,0	5,08	0,200	105	0	0,0		0,0
6,0	7,62	0,300	132	1	0,0		
8,0	10,16	0,400	161	0,758	0,1		
10,0	12,70	0,500	182	1,028	0,1		

Fonte: Autores, (2021).

Figura 27 - Gráfico de penetração do teor de 5%



Fonte: Autores, (2021).

- Penetração com **teor de 10%**

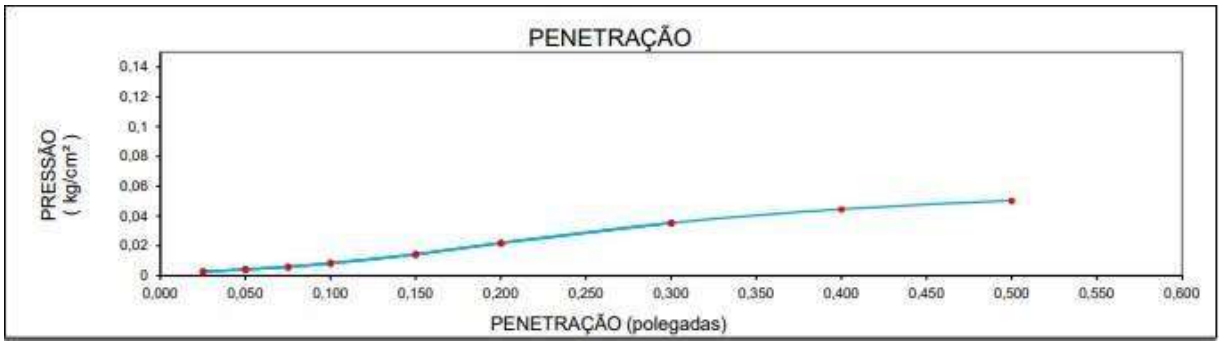
A leitura é indicada no Quadro 15. Através da Figura 28 é possível observar a correspondente tensão mostrando novamente uma curva em ascensão. Em comparação ao teor de 5%, onde o gráfico teve uma ascendência maior, essa diferença foi referência a umidade ótima, no qual foi menor que o teor 10%.

Quadro 15 - Leituras do relógio comparador para o teor 10%

PENETRAÇÃO							
Tempo em minutos	Penetração		Pressão padrão (kg/cm²)	MOLDE Nº 7			
				Leitura (mm)	Pressão (kg/cm²)		ISC (%)
	mm	Pol			Calculada	Corrigida	
0,5	0,63	0,025		0	0,0		
1,0	1,27	0,050		0	0,0		
1,5	1,90	0,075		0	0,0		
2,0	2,54	0,100	70	0	0,0		0,0
3,0	3,81	0,150		0	0,0		
4,0	5,08	0,200	105	0	0,0		0,0
6,0	7,62	0,300	132	0	0,0		
8,0	10,16	0,400	161	0,458	0,0		
10,0	12,70	0,500	182	0,517	0,1		

Fonte: Autores, (2021).

Figura 28 – Gráfico de penetração do teor 10%



Fonte: Autores, (2021).

- O ensaio de Permeabilidade foi executado conforme a NBR 14545, onde utilizou-se o método B de carga variável. Por fim, determina-se através deste o coeficiente de permeabilidade descrito pela equação 5.

Devido à falta de consistência do material no ensaio de CBR, para este ensaio de permeabilidade utilizou-se a umidade ótima da base granular como referência para a realização do mesmo. Portanto, foram apenas acrescentados 5,1% de umidade na amostra, ou seja, 255g de água.

O processo do ensaio é realizado em algumas etapas, sendo a primeira a compactação do solo com 5kg de mistura no total. Em seguida, coloca-se o filtro na parte superior e inferior

do molde, onde em ambas as partes se aplica argila plástica (bentonita), conforme demonstrado na figura 29 a seguir.

Figura 29 - Aplicação da argila plástica

Fonte: Autores, (2021).

Em seguida, na parte inferior prepara-se a base do permeâmetro com anel de borracha, uma camada de areia grossa e uma tela de arame. Já na parte superior do molde coloca-se por cima do filtro a brita graduada simples, conforme a figura 30 a seguir.

Figura 30 - Parte superior do molde

Fonte: Autores, (2021).

Posteriormente, coloca-se o tampo superior. Logo, efetua-se a saturação por fluxo ascendente conectando a bureta de vidro, a qual tem uma área de 768 cm², por meio da mangueira no cilindro, onde pode-se obter os valores de carga hidráulica e tempo. Foram determinados 10min para a formação de 4 (quatros) valores de referência, as demonstrações de resultados serão apresentadas nos tópicos de cada teor a seguir.

- **Teor de 5%**

Para o teor de 5%, utilizou-se 4750g de base granular e 250g de pó de *flake*, após a mistura do material foram executadas as etapas anteriormente descritas para este ensaio. Incialmente, meça-se a temperatura da água e a altura do corpo de prova que se encontra em 22,9 ºC e 12,6 cm, respectivamente. As medidas do corpo de prova, são utilizadas depois para descobrir a área, a qual chegou no valor de 524,76 cm².

Em seguida, coloca-se o cilindro já impermeabilizado no sistema de aplicação, onde obtém-se os valores de carga hidráulica (h) e de tempo (t). Sendo demonstrados na figura 31, onde a bureta mostra o valor de h e os cronômetros os valores de t.

Figura 31 - Carga hidráulica e tempo para o teor de 5%

Fonte: Autores, (2021).

Os valores obtidos na figura anterior, demonstra-se de forma mais clara no quadro 16 a seguir.

Quadro 16 - Leituras de carga hidráulica e tempo para o teor de 5%

Carga hidráulica (cm)	**Tempo (s)**
0 cm	439s
71,45 cm	600s
36,2 cm	600s
0 cm	137s

Fonte: Autores, (2021).

No quadro 16, pode-se entender a relação entre carga hidráulica e tempo. Na primeira linha demonstra que, após a colocação da água na bureta, levou apenas 7:19,21s para que água escorresse totalmente, o qual este fato está correlacionado ao preenchimento dos vazios. Porém, na segunda linha, ela levou os 10min estabelecidos, tendo, por fim, uma carga hidráulica de 71,45cm. Na última e quarta linha, a água escorreu mais rápido pelo fato de a travessia interna pelo corpo de prova da mesma já ter sido concluída. Por fim, podemos perceber na figura 32, que no final a água já estava saindo pela tampa superior.

Figura 32 - Escoamento da água no teor de 5%

Fonte: Autores, (2021).

Posteriormente à obtenção dos dados no ensaio, calcula-se o coeficiente de permeabilidade aplicando a equação 5, onde utilizou-se os valore de 71,45 cm e 36,2 cm para as cargas hidráulicas inicial e final, respectivamente.

No entanto, o coeficiente tem-se o valor de $2{,}08x10^{-2}$, o qual tem sua ordem de 10^{-2} , que é igual da base e, sendo assim, a sua classificação granulometria também é areia.

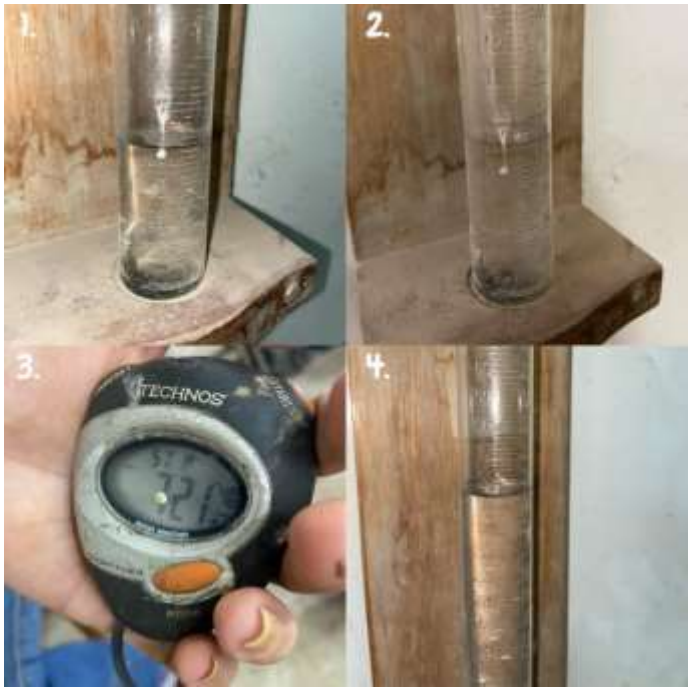
Considerando os aspectos e resultados, está mistura tem mais números de vazios do que a base sem mistura, o que a torna mais permeável e assim facilita a drenagem do mesmo.

- **Teor de 10%**

Neste teor utilizou-se 4500g de base granular e 500g de pó de flake, em seguida aplicou-se o sistema do ensaio de permeabilidade no cilindro. Para a temperatura da água e a altura do corpo de prova, mediu-se 22,9 ºC e 12,6cm, respectivamente, para este teor.

Em seguida, obtém-se os valores de carga hidráulica (h) e de tempo (t), conforme demonstrados na figura 33.

Figura 33 - Carga hidráulica e tempo para teor de 10%



Fonte: Autores, (2021).

No quadro 17, demonstra-se os valores obtidos, conforme figura 28 anteriormente.

Quadro 17 - Leituras de carga hidráulica e tempo para o teor de 10%

Carga hidráulica (cm)	Tempo (s)
71,50cm	600s
70,82 cm	600s
0 cm	441s
24,41cm	600s

Fonte: Autores, (2021).

O quadro anterior demonstra a relação entre carga hidráulica e tempo. Na primeira linha, entenda-se que nos 10:00,00s após a colocação, a mesma a carga hidráulica ficou situada em 71,50 cm. Somente na penúltima e terceira linha em que se teve o escoamento total da água, levando apenas 07:21,40s. Na figura 34, demostra a água escoando pela parte superior.

Figura 34 - Escoamento da água no teor de 10%

Fonte: Autores, (2021).

A figura anterior apenas mostra que a água percorreu todo o solo compactado, por este fato a mesma acaba saindo por cima. Onde escorreu até chegar na carga hidráulica de 24,41cm nos 10:00,00s propostos, por fim calcula-se o coeficiente de permeabilidade, a partir dos dados obtidos para h1 e h2 os quais utiliza-se 71,5 cm e 24,41 cm respectivamente.

Para este cálculo utiliza-se a equação 5, a qual chegou no valor de 3,30x10-2, sendo de ordem 10-2 também como a base e o teor de 5% assim recebe a mesma classificação granulométrica. O que muda para este teor seria o número de vazios, o que podemos relacionar ao aumento do coeficiente que quanto maior este valor mais vazios ele tem.

- **Teor de 15%**

Utilizou-se 4250g de base granular e 750g de pó de *flake* para este teor, em seguida meça-se a temperatura da água e a altura do corpo de prova, onde obteve 22,9 ºC e 12,5cm, respectivamente para cada. Na figura 35, tem-se as cargas hidráulicas e tempos obtidos através da aplicação do ensaio para este teor.

Figura 35 - Carga hidráulica e tempo para o teor de 15%

Fonte: Autores, (2021).

Conforme os resultados obtidos na figura anterior, desenvolve-se o quadro 18 para uma melhor relação entre os dados.

Quadro 18 - Leituras de carga hidráulica e tempo para o teor de 15%

Carga hidráulica (cm)	Tempo (s)
0 cm	157s
0 cm	141s
71,43	600s
0 cm	133s

Fonte: Autores, (2021).

As leituras demonstradas no quadro 18, consta valores parelhos para os dois primeiros 10 min deste ensaio, sendo uma a carga hidráulica igual a 0. Apenas na penúltima linha, a água se manteve estabilizada por 600s, tendo assim uma carga hidráulica igual a 71,43cm. Na figura 36 demonstra que a água escoou sucessivamente.

Figura 36 - Escoamento da água no teor de 15%

Fonte: Autores, (2021).

Após a apuração dos dados obtidos neste ensaio, calcula-se o coeficiente de permeabilidade pela equação 5, onde não pode ser calculado, pois obteve-se apenas uma carga hidráulica diferente de 0.

Posteriormente, verificou-se que quanto maior a quantidade de pó de *flake* na mistura, maior são seus números de vazios. No entanto, a água escoou totalmente nos dois primeiros pontos e no último, pelo fato de ela preencher os vazios no mesmo.

- O RCS - ensaio de compressão simples é método para a determinação da resistência a compressão do corpo de prova não confinada mediante a aplicação de carga com controle de deformação.

Inicialmente definido, foram realizados 13 ensaios devido a variável em função da confiabilidade. Para a realização do corpo de prova é separado 4 Kg de base com seus respectivos teores e colocado a quantidade de água equivalente a umidade ótima de 5,1%, que foi de 204 g de água. Após, é realizada a compactação com 3 camadas de 26 golpes.

Assim que pronto, o corpo de prova é colocado na máquina de compressão coincidindo o seu eixo com o eixo da placa de carregamento e zerando os extensômetros e inicia-se o carregamento. Anotar os valores acusados nos extensômetros até que se verifique a ruptura do corpo como mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Ensaio de RCS

Fonte: Autores, (2021).

- RCS com **teor de 5%**

Para a realização do mesmo foram separados 3.750 kg de base e 250 g de mistura. O Quadro 19 mostra os valores relatados no extensômetro.

Quadro 19 - Valores do extensômetro com mistura de 5%

(continua)

Teor 5%			
Nº MOLDE	PESO	RESISTÊNCIA	TEMPO (s)
1	1875	4N	6,3s
2	1810	2N	6,0s
3	1750	5N	6,1s
4	1812	7N	6,8s
5	1808	5N	6,1s
6	1876	5N	6,2s
7	1747	4N	6,0s
8	1811	7N	6,9s
9	1808	5N	6,2s

(conclusão)

10	1875	5N	6,3s
11	1811	4N	6,1s
12	1874	5N	6,3s
13	1810	5N	6,1s

Fonte: Autores, (2021).

Após a obtenção dos dados, os menores foram inseridos no Software Gretl e retirado suas referências quanto a estatística e gráficos. A figura 38 mostra os resultados obtidos na estática descritiva e a Figura 39 mostra o gráfico resultado do tempo x resistência.

Figura 38 - Estática descritiva com teor 5%

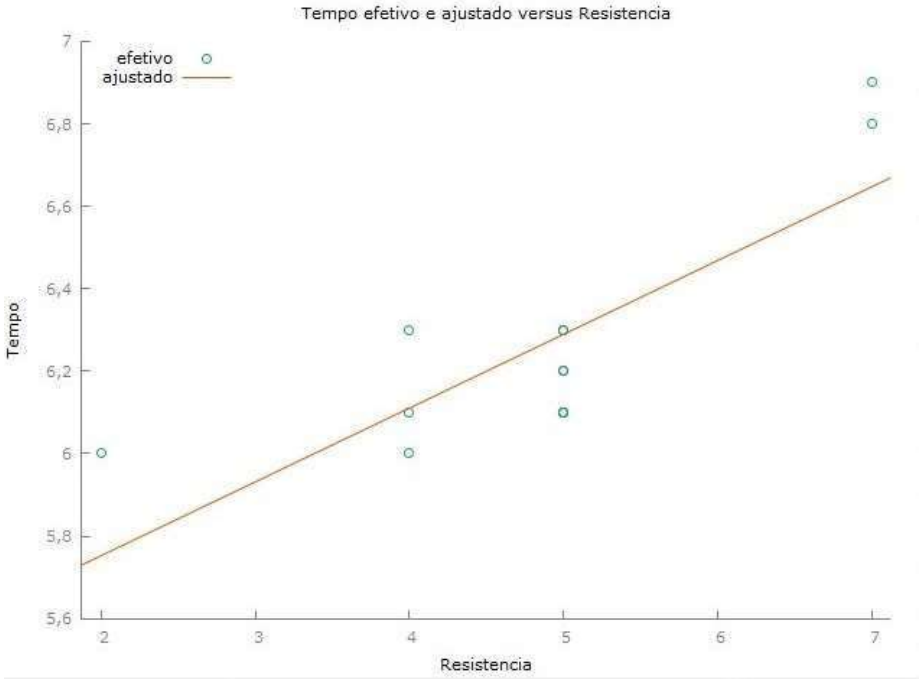
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
Resistencia	4,8462	5,0000	2,0000	7,0000
Tempo	6,2615	6,2000	6,0000	6,9000

	Desv. Padrão	C.V.	Enviesamento	Curtose Ex.
Resistencia	1,2810	0,26434	-0,20068	0,69440
Tempo	0,28148	0,044954	1,4135	0,77285

	Interv. IQ	Obs. ausentes
Resistencia	1,0000	0
Tempo	0,20000	0

Fonte: Autores, (2021).

Figura 39 - Gráfico do tempo x resistência



Fonte: Autores, (2021).

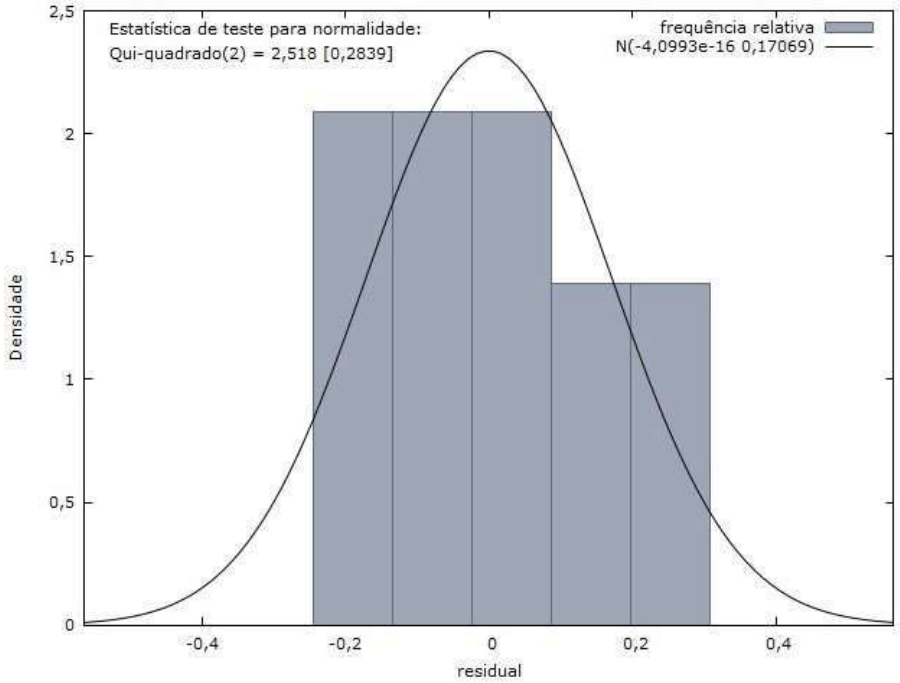
Para o mesmo teor, foi admitido uma hipótese de normalidade para verificar se a distribuição da probabilidade está aproximada da distribuição normal, mostrados nas figuras 40 e 41.

Figura 40 - Hipótese de normalidade para o teor de 5%

```
Distribuição de frequência para residual, observações 1-13
número de classes = 5, média = -4,09929e-016, desvio padrão = 0,170685

      intervalo    pt. médio  frequência   rel.     acum.

          < -0,13379  -0,18906       3     23,08%   23,08% ********
-0,13379 - -0,023242 -0,078516      3     23,08%   46,15% ********
-0,023242 -  0,087305  0,032031     3     23,08%   69,23% ********
 0,087305 -  0,19785   0,14258      2     15,38%   84,62% *****
         >=  0,19785   0,25313      2     15,38%  100,00% *****

Teste para a hipótese nula de distribuição normal:
Qui-quadrado(2) = 2,518 com p-valor 0,28391
```

Fonte: Autores, (2021).

Figura 41 - Gráfico de teste de normalidade para o teor de 5%



Fonte: Autores, (2021).

Após a admissão da normalidade, nota- se que a amostra com 5% de mistura fica estável. Apesar da baixa compressão, a mesma apresenta resultados uniformes, o que significa que a influência do resíduo é homogenia em relação a distribuição. Acima de 5% de resíduo, a amostra fica completamente instável, o que não possível moldar os corpos de prova, pois não houve aderência como mostra na Figura 42.

Figura 42 - Instabilidade do corpo de prova com mistura em 10%

Fonte: Autores, (2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa proposta tem como pretensão a expansão da engenharia tanto no quesito de pavimentação flexível permeável, quanto ao bem social na questão de reaproveitamento de materiais já descartados, no qual traz um grande prejuízo a natureza.

A Problemática teve como prioridade a realização de mistura de resíduos reutilizáveis na base, da qual propôs comprovar na tentativa de acertos nos parâmetros geomecânicos.

Para a aplicação do sistema, foram realizados diversos ensaios laboratoriais de compactação, densidade, permeabilidade e RCS na base granular pura e com as misturas estabelecidas em 5%,10% e 15% de teores, para haver um comparativo sólido em relação a base natural e o melhor teor comprovado.

Inicialmente, foi realizado o ensaio de compactação com seus respectivos teores e todos deram a umidade ótima, quase o dobro da base granular natural. Após, foi realizado o ensaio de CBR, do qual foi notável que a umidade ótima do teor de 15% era impossível a compactação devido à falta de aderência do material. Então, foi designado como padrão de umidade ótima da base granular estabelecida pela pedreira em 5,1%. Desse modo, os ensaios adiante foram realizados dentro desta umidade.

A partir disso, foi realizado o ensaio de permeabilidade, do qual foi possível notar que o teor de 15% não obteve nem dois pontos de carga hidráulica, pois a água escoou rapidamente e preencheu todos os vazios, mostrando que quanto mais quantidade de pó de P.E.T maior é o número de vazios, deixando o material sem compactação e adensamento.

O último ensaio foi o RSC, do qual só foi possível a realização com a amostra estabelecida com o teor de 5% de mistura, pois as outas amostras não estavam estabilizadas granulometricamente. Desse modo, não foi possível a estabilidade das mesmas após a retirada do corpo de prova.

Em fase conclusiva, os resultados apontam a mistura na proporção de 5/95% como a de melhor uso, pois apresenta características semelhantes a base natural. O teor com 5% manteve a expansão com o mesmo índice da base em 0%. A penetração, assim como da base natural, a mistura também manteve seu formato linear, ou seja, não apresentou mudanças no seu formato. A classificação em relação a permeabilidade manteve a mesma, ambas são areia. Em relação ao RCS, houve uma redução de resistência a compressão, porém a amostra se apresenta homogênea na mistura.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se um estudo mais amplo sobre a estabilidade granulométrica já é com a mistura.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7207/82. **Termologia e classificação de pavimentação.** 1982.

ACIOLI, Laura Albuquerque. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5843/000521171.pdf Acesso em: 08 out. 2020.

AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.: CRES, F.N.; ALFAKIH, E. (1994). **Techniques alternatives em assainissement pluvial: choux, conception, realization et entertain.** Paris: Lavoisier.372.

BERNUCCI at. al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro, Petrobras, 2007.

CNT, Pesquisas de Rodovias. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/ Acesso em: 22 set. 2020.

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA UFPR. Transportes B – Tipos de pavimentos. 2009. Disponível em: http://dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/mod1Introducao.pdf Acesso em 08 out. 2020

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. IPR-719. **Manual de pavimentação.** 2006.

FERGUNSON, B.K. (2005). **Porous Pavements.** Taylor and Francis Group, New York
IBGE. **Perfil dos Municípios Brasileiros: 2018.** Ed. Rio de Janeiro, 2019.

GONÇALVES, Andre Bertoletti; OLIVEIRA, Rafael Henrique de. **Pavimentos Permeáveis e sua influência sobre a drenagem a d**. 2014. 12 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Pha, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=11805. Acesso em: 12 nov. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais.** 2017

MARODIN, Emerson Edinei. **Alternativa de dimensionamento para o pavimento da BR-448: Análise mecanística com aplicação de BGTC**. 2010. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28568/000769531.pdf?sequence=1 Acesso em: 20 set. 2020.

PRATT, C. J. 1999. **Use ofe permeable, reservoir pavement constructions for stomwater treatment and storage for re-use.** Whater Science and Technology, vol 39, nº 5, pp 145 - 151.

RAIMBAULT, G.; ANDRIEU, H.; BERTHIER, E.; JOANNIS, C.; LEGRET, M. 2002. **Infiltration des eaux pluviales à traves les surfaces urbaines – Des revêtements imperméables aux structures-réservoirs.** In: Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 238-maio-junho 2002 pp 39-50

VIRGILIS, Afonso Luís Corrêa de. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos e cheias**. 2009. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-08092010-122549/publico/Dissertacao_Afonso_Luis_Correa_de_Virgiliis.pdf. Acesso em: 02 nov. 2020.