

ÉRIKA BIANCA MACHADO DO NASCIMENTO

**ESTUDO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS COMO ELEMENTO
SUSTENTÁVEL AMENIZADOR DAS INUNDAÇÕES URBANAS**

SÃO LUÍS
2016

ÉRIKA BIANCA MACHADO DO NASCIMENTO

**ESTUDO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS COMO ELEMENTO
SUSTENTÁVEL AMENIZADOR DAS INUNDAÇÕES URBANAS**

Monografia apresentada a Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

SÃO LUÍS
2016

Nascimento, Érika Bianca Machado do

Estudo de pavimentos permeáveis como elemento sustentável amenizador das inundações urbanas. / Érika Bianca Machado do Nascimento – São Luís, 2016.

98f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade estadual do Maranhão, 2016.

Orientadora: Maria Teresinha de Medeiros Coelho.

1. Pavimentos permeáveis 2. Sustentável 3. Reservatório 4. Drenante.
I. Título

CDU 693.78(556.166:614.8)

ÉRIKA BIANCA MACHADO DO NASCIMENTO

**ESTUDO DE PAVIMENTOS PERMEAVEIS COMO ELEMENTO
SUSTENTAVEL AMENIZADOR DAS INUNDAÇÕES URBANAS**

**Monografia apresentada ao curso de
Engenharia Civil da Universidade
Estadual do Maranhão – UEMA, para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.**

Aprovada em: 13 / 07 / 2016

Banca Examinadora

Profa. Dr^a Maria Teresinha de Medeiros Coelho
Doutora em Urbanismo - UFRJ
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Ms. Demerval Dias Ramos
Mestre em Administração - UFSC
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Esp. Arnaldo Pinheiro de Azevedo
Desenhista Industrial - UFMA
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser o nosso alicerce em todos os momentos e principal responsável por nossas conquistas!

À minha mãe, Joselma Machado do Nascimento, por todo apoio, incentivo, compreensão e companheirismo de noites não dormidas durante toda a minha vida e ao meu pai, Raimundo Pereira do Nascimento Filho pelo inigualável apoio ao longo da vida.

À minha irmã, Jéssica Bianca Machado do Nascimento pela consideração, orações e momentos de alegria que me retiravam dos estudos.

À minha família, avô (Raimundo Alves Machado), avó (Ana da Silva Machado), tios, tias e primas que sempre me acompanharam não só na trajetória acadêmica, mas dando total apoio nos quesitos da vida.

Ao meu amor, Walder Jansen de Mello Lobão, por todo apoio e carinho, e pela enorme ajuda na normatização desta monografia. Sem você, não teria conseguido.

Aos meus amigos que dividiram momentos ímpares da vida e várias noites mal-dormidas ao longo de toda essa jornada do curso: Ytallo Rafaell Teixeira de Albuquerque e Gilcyvânia Castro Corvelo Costa.

À família BM (Walder Jansen, Georgiana Maia, Luiz Fernando, Alice Bianca, Cássia Cristina, Carolina Jansen, João Luis, Lucas Noletto e Luan Bruno) amigos de longa data, pela sincera amizade e nesses longos 8 anos, pelos momentos de lazer, risadas e momentos de sobriedade.

À prof. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho, pela orientação neste trabalho e pelos ensinamentos repassados em sala de aula.

À esta Universidade, por ter me acolhido há 5 anos, e me feito crescer como pessoa e profissional.

RESUMO

Estudaremos no presente trabalho os Pavimentos Permeáveis, que são pavimentos que reduzem o escoamento superficial em até 100% dependendo da intensidade da chuva, e retardam a chegada da água ao subleito reduzindo a erosão. O revestimento desse pavimento deve permitir a passagem rápida da água, que fica armazenada por um período nas camadas de base e sub-base, funcionando como reservatório e filtro (colchão drenante). Isso possibilita vários benefícios para o meio ambiente, por isso eles também são chamados de Pavimento Sustentável. Diante da crescente impermeabilização e urbanização das cidades, essa é uma alternativa para amenizar as inundações urbanas e preservar as áreas permeáveis dos grandes centros urbanos, bem como, evitar que as cidades médias cheguem ao grau de saturação das maiores. Porém, é significativo destacar que essa é uma alternativa amenizadora que só terá efeito se for executada associadamente aos sistemas tradicionais de drenagem, como sarjetas, valetas entre outros.

Palavras-chave: Pavimentos permeáveis, reservatório, colchão drenante, sustentável.

ABSTRACT

We will study in this work the Permeable Pavements, which are floors that reduce runoff by up to 100% depending on the intensity of the rain, and delay the arrival of water to the subgrade reducing erosion. The coating of the deck to allow quick passage of water, which is stored for a period in the base and sub-base layers, functioning as a reservoir and filter (draining mattress). This provides several benefits to the environment, so they are also called sustainable flooring. Given the growing waterproofing and urbanization of cities, this is an alternative to mitigate urban flooding and preserve the permeable areas of large urban centers as well as preventing the medium-sized cities reach the degree of saturation of the largest. However, it is significant to note that this is an alternative that will only take effect if it is executed in association with traditional drainage systems such as gutters, ditches and others.

Keywords: Permeable pavements, reservoir, Draining mattress, sustainable.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Aspectos da CPA no Aeroporto Santos Drummond – RJ
- Figura 2 - Revista Infraestrutura – PINI
- Figura 3 - Pavimento de Concreto Vazado Preenchido com Gramínea
- Figura 4 - Seção Tipo de Um Pavimento Permeável.
- Figura 5 - Seção Tipo de Um Pavimento Permeável
- Figura 6 - Tipos de Infiltrações dos Pavimentos Intertravados
- Figura 7 - Tipos de Pavimentos Permeáveis
- Figura 8 - Camadas de Um Pavimento
- Figura 9 - Estrutura com Sobrecamada Porosa
- Figura 10 - Pavimentos com Reservatórios em Nível ou Inclinação
- Figura 11 - Exemplos de Dispositivos Laterais Localizados na Camada Inferior da Base do Reservatório
- Figura 12 - Exemplos de Dispositivos de Descarga Lateral Localizados na Parte Superior da Base do Reservatório
- Figura 13 - Dispositivos que Permitem Escoamento Superficial e Protegem o Pavimento
- Figura 14 - Reservatório Revestido com Geomembrana
- Figura 15 - Pavimentos Simulados
- Figura 16 - Escoamento Superficial nas Superfícies Ensaaiadas
- Figura 17 - Esquema de Localização dos Furos
- Figura 18 - Furos Feitos no Estacionamento do CCT
- Figura 19 - Amostras Retiradas dos Quatro Furos para Realização dos Ensaios em Laboratório
- Figura 20 - Equipamentos Utilizados no Ensaio de Permeabilidade
- Figura 21 - Amostra Indeformada Retirada do Estacionamento do CCT
- Figura 22 - Amostra Indeformada Retirada do Estacionamento do CCT
- Figura 23 - Esquema do Edômetro
- Figura 24 - Edômetro Saturado Depois da Realização do Experimento
- Figura 25 - Equipamento de Compactação

Figura 26 - Curva de Compactação do Furo 1 Feito no Estacionamento

Figura 27 - Curva de Compactação do Furo 2 Feito no Estacionamento

Figura 28 - Curva de Compactação do Furo 3 Feito no Estacionamento

Figura 29 - Curva de Compactação do Furo 4 Feito no Estacionamento

Figura 30 - Colocação do Papel Filtro e Esquema de Compactação

Figura 31 - Montagem e Esquema para Determinação da Expansão

Figura 32 - Corpos de Prova Imersos em Água por 4 Dias para a Realização do Ensaio CBR

Figura 33 - Prensa do Ensaio CBR para Obtenção da Resistência à Penetração

Figura 34 - Esquema da Prensa do Ensaio CBR

Figura 35 - Resultado dos Ensaios CBR e Expansão no Furo 01

Figura 36 - Resultado dos Ensaios CBR e Expansão no Furo 02

Figura 37 - Resultado dos Ensaios CBR e Expansão no Furo 03

Figura 38 - Resultado dos Ensaios CBR e Expansão no Furo 04

Figura 39 - Etapas para a Execução de um Pavimento Permeável com Peças Pré-Moldadas de Concreto

Figura 40 - Esquema com a seção do pavimento dimensionado

Figura 41 - Pavimento Intertravado Permeável Depois de Sofrer o Processo de Colmatação

Figura 42 - Descrição dos materiais que compõem as camadas dimensionadas

Figura 43 - Gráfico do Limite de Liquidez do Furo 01 Feito no Estacionamento

Figura 44 - Gráfico do Limite de Liquidez do Furo 02 Feito no Estacionamento

Figura 45 - Gráfico do Limite de Liquidez do Furo 03 Feito no Estacionamento

Figura 46 - Gráfico do Limite de Liquidez do Furo 04 Feito no Estacionamento

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das Simulações nas Superfícies Discriminadas

Tabela 2 - Coeficiente Médio de Permeabilidade do Subleito do Estacionamento do CCT

Tabela 3 - Valores Típicos de Coeficientes de Permeabilidade

Tabela 4 - Dados do Ensaio de Compactação Furo 1

Tabela 5 - Dados do Ensaio de Compactação Furo 2

Tabela 6 - Dados do Ensaio de Compactação do Furo 3

Tabela 7 - Dados do Ensaio de Compactação do Furo 4

Tabela 8 - Valores Típicos de Coeficiente de Permeabilidade

Tabela 9 - Granulometria para Camadas de Sub-Base e Base de Um Pavimento Permeável.

Tabela 10 - Granulometria Recomendada para Camadas de Assentamento e Material de Rejunte para Pavimento Permeável

Tabela 11 - Recomendação de Espessura Mínima da Camada de Base

Tabela 12 - Porosidade típica de alguns materiais

Tabela 13 - Dados do Ensaio de LL e LP do Furo 1

Tabela 14 - Dados do Ensaio de LL do Furo 2

Tabela 15 - Dados do Ensaio de LP do Furo 2

Tabela 16 - Dados do Ensaio de LL e LP do Furo 3

Tabela 17 - Dados do Ensaio de LL e LP do Furo 4

Tabela 18 - Percentual Granulométrico do Furo 1

Tabela 19 - Percentual Granulométrico do Furo 2

Tabela 20 - Percentual Granulométrico do Furo 3

Tabela 21 - Percentual Granulométrico do Furo 4

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------------|--|
| ABCP | Associação Brasileira de Cimento Portland |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| °C | Grau Celsius |
| cm³ | Centímetros cúbicos |
| g | Gramma |
| hs | Horas |
| ISC | Índice de Suporte Califórnia |
| kg | Kilograma |
| kN | Kilonewton |
| LL | Limite de Liquidez |
| LP | Limite de Plasticidade |
| µm | Micrômetro |
| mg | Miligrama |
| mL | Mililitro |
| Mm | Milímetro |
| Ng | Nanograma |
| % | Porcento |
| seg | Segundos |

SUMÁRIO

| | p. |
|------------|---|
| 1 | INTRODUÇÃO 12 |
| 1.1 | Considerações Iniciais 12 |
| 2 | OBJETIVOS 14 |
| 2.1 | Objetivo Geral 14 |
| 2.2 | Objetivo Específico 14 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA 15 |
| 3.1 | Pavimentos Permeáveis 15 |
| 3.2 | Tipos de Pavimentos 16 |
| 3.3 | Princípio de Funcionamento 24 |
| 3.4 | Componentes 25 |
| 3.4.1 | Revestimento, base e sub-base 25 |
| 3.4.2 | Sobrecamada 26 |
| 3.4.3 | Reservatórios 27 |
| 3.4.3.1 | Reservatórios Nivelados ou Inclinados 28 |
| 3.4.3.2 | Reservatórios com Saída Lateral 29 |
| 3.4.4 | Geotêxteis 32 |
| 3.4.5 | Geomembranas 33 |
| 3.5 | Comparação entre Pavimentos permeáveis e tradicionais 34 |
| 3.6 | Vantagens e Desvantagens 37 |
| 3.7 | Sustentabilidade desse Tipo de Pavimento 38 |
| 4 | METODOLOGIA E RESULTADOS DOS ENSAIOS 40 |
| 4.1 | Ensaio de Permeabilidade 42 |
| 4.1.1 | Equipamentos 43 |
| 4.1.2 | Preparação do corpo de prova 43 |
| 4.1.3 | Procedimento experimental 44 |
| 4.1.4 | Cálculos e Resultados 46 |
| 4.2 | Ensaio de Umidade do solo 47 |
| 4.2.1 | Materiais Utilizados 48 |
| 4.2.2 | Procedimento Experimental 48 |
| 4.2.3 | Resultados 48 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.3 | Ensaio de Compactação | 49 |
| 4.3.1 | Materiais utilizados | 49 |
| 4.3.2 | Procedimento Experimental | 50 |
| 4.3.3 | Resultados | 51 |
| 4.4 | Ensaio CBR ou ISC (Índice de Suporte Califórnia) | 55 |
| 4.4.1 | Procedimento Experimental | 55 |
| 4.4.2 | Resultados | 59 |
| 5 | ROTEIRO DE UM PROJETO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO PERMEÁVEL | 64 |
| 5.1 | Seção Tipo | 64 |
| 5.2 | Informações do Empreendimento | 64 |
| 5.3 | Materiais para Base e sub-base | 65 |
| 5.4 | Materiais para Camada de Assentamento e Rejunte | 66 |
| 5.5 | Revestimento | 67 |
| 5.6 | Pré-dimensionamento das camadas de base e sub-base | 68 |
| 6 | ETAPAS DE EXECUÇÃO DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL UTILIZANDO PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO | 71 |
| 7 | ESTUDO DE CASO – PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO | 74 |
| 8 | MANUTENÇÃO | 79 |
| 9 | DESEMPENHO | 80 |
| 10 | CONCLUSÃO | 81 |
| | REFERÊNCIAS | 82 |
| | ANEXO 1 – Ensaios Complementares | 84 |
| | ANEXO 2 – Método de Ensaio para coeficiente de infiltração em pavimento permeável | 97 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

As cidades brasileiras vêm sofrendo uma urbanização acelerada desde o início do século XX, devido ao processo chamado de Industrialização. Esta foi responsável pelo deslocamento populacional do campo para a cidade, conhecido como êxodo rural.

Com isso, surgiram problemas característicos de grandes cidades urbanas como é o caso das Inundações. Uma das causas disso se dá no aumento das áreas impermeáveis, pois tivemos um avanço das edificações e pavimentações das vias urbanas de modo desordenado, bem como das ocupações indevidas das planícies de inundação.

A fim de mitigar esse problema, temos o uso dos dispositivos de drenagem sustentável, dentre eles tem-se os pavimentos permeáveis. Ao contrário dos pavimentos convencionais que durante uma chuva permitem um rápido escoamento superficial da água podendo causar erosões e enchentes. Segundo Ferguson (2005), este pavimento age com a finalidade de reduzir esse volume de escoamento para que a água infiltre total ou parcialmente no pavimento e nas demais camadas do solo, necessitando de um sistema auxiliar de drenagem.

Também conhecidos como pavimentos drenantes, eles são utilizados com a finalidade de resgatar as condições anteriores de pré-urbanização (solo compactado). Isso porque, temos nas áreas permeáveis uma grande aliada na diminuição do escoamento superficial direto, uma vez que ele permite a infiltração das águas precipitadas diretamente no solo, amenizando o pico de vazão do curso d'água e, conseqüentemente, o sistema de drenagem urbana convencional (boca de lobo, sarjetas etc) irá captar um volume de água menor.

Esses tipos de pavimentos são também considerados ecologicamente corretos visto que abastecem os lençóis freáticos, melhora a qualidade da água, e reduz o processo erosivo como salienta Ferguson (2005).

Segundo Urbonas e Stahre (1993 *apud* Araújo *et al*, 1999), os pavimentos permeáveis podem ser classificados, em três tipos: Pavimento de Asfalto Poroso, Pavimento de Concreto Poroso e Pavimento de Blocos de Concreto Vazado preenchido com material granular (areia ou grama). Estes serão analisados posteriormente, no decorrer desta revisão bibliográfica.

É significativo destacar ainda que, como todo pavimento, este para o seu pleno funcionamento, necessita, como salientam Araújo *et al* (1999) ser utilizado racionalmente de modo a respeitar seus limites físicos e desde que se tenha uma manutenção preventiva que deve ser realizada trimestralmente a fim de evitar o seu entupimento.

O uso desse pavimento deve ser aliado ao seu correto dimensionamento que leva em consideração, segundo Marchioni *et al* (2011), a intensidade da chuva no local e as características do solo, bem como as condições de tráfego a qual será submetido o pavimento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar os pavimentos permeáveis como elemento sustentável amenizador das inundações urbanas.

2.2 Objetivo Específico

- Apresentar uma proposta com base na literatura de dimensionamento utilizando pavimento permeável Intertravado para o estacionamento do CCT (Prédio de Engenharia da UEMA);

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Pavimentos Permeáveis

Segundo Urbonas e Stahre (1993 *apud* Araújo et al, 1999) Pavimento Permeável é um dispositivo de infiltração em que a água que escoar superficialmente é desviada por meio de uma superfície permeável para o interior de um reservatório de pedras localizado sob a superfície do terreno.

Ferguson (2005 *apud* Gonçalves et al, 2014) afirma ainda que, pavimentos permeáveis são aqueles que possuem espaços livres em sua estrutura por onde a água escoará, podendo infiltrar no solo ou ser transportada por meio de sistemas auxiliares de drenagem.

Para Marchioni et al (2011), os pavimentos permeáveis são definidos como aqueles que possuem espaços livres na sua estrutura onde a água e o ar podem atravessar.

Tem em sua composição basicamente, duas camadas de agregados, sendo uma agregado fino ou médio e outra graúdo e uma camada do pavimento permeável em si. Schueller (1987, *apud* Araújo et al, 1999).

De modo genérico, Araújo et al (1999) afirma que, esse tipo de pavimento possui em seu dimensionamento valores que variam da seguinte maneira: para que o escoamento infiltre no revestimento de forma rápida, ele deve possuir uma espessura de 5 a 10cm. Passar por um filtro de agregado de $\Phi=1,25\text{cm}$ e espessura aproximadamente de 2,5cm. Após isso, vai para uma câmara ou reservatório de pedras com agregados de $\Phi=3,8$ a 7,6 cm.

O mesmo autor afirma ainda que o revestimento permeável é um meio para que a água chegue de forma rápida ao reservatório de pedras onde então será infiltrada para o subsolo ou coletado por tubos de drenagem e transportado para uma saída. Dessa forma temos que, a capacidade de armazenamento dos pavimentos porosos será determinada pela profundidade do reservatório de pedras subterrâneo.

Urbonas (1993, *apud* Araújo et al, 1999) afirma que não há um fator limitador para o uso de pavimentos permeáveis, a menos que a camada do subsolo (subleito) seja impermeável ou tenha um baixo índice de permeabilidade.

Além disso, as principais limitações deste dispositivo ocorrem quando tem-se:

- A água drenada contaminada, pois haverá impacto sobre o lençol freático e o escoamento subterrâneo;
- Falta de controle na construção e manutenção, ocasionando entupimento do dispositivo de modo que ele se tornará ineficiente.

3.2 Tipos de Pavimentos Permeáveis

Existem vários tipos de pavimentos permeáveis, apresenta-se a seguir:

Urbonas (1993, *apud* Araújo et al, 1999), classificam os Pavimentos Permeáveis em três tipos: Pavimento de Asfalto Poroso, Pavimento de Concreto Poroso e Pavimento de Blocos de Concreto Vazado preenchido com material granular (areia ou grama).

Tomaz (2009) classifica os pavimentos porosos em:

- **TIPO A:** Quando toda água infiltra no solo (Infiltração total);
- **TIPO B:** Quando parte da água infiltra no solo (Infiltração parcial);
- **TIPO C:** Quando nenhuma água infiltra no solo

Suzuki et al (2013) define os pavimentos permeáveis de Estruturas-Reservatório. Isso ocorre devido a duas funções desse tipo de pavimento:

- Função Mecânica, que está intimamente associada ao termo Estrutura, visto que ele suporta o carregamento do tráfego de veículos;
- Função Hidráulica, que está intimamente ligada ao termo Reservatório, pois essa estrutura retém temporariamente a água infiltrada pelos vazios ou pelos poros do pavimento até chegar na base/sub-base.

Ainda segundo esse autor, o funcionamento hidráulico dos pavimentos porosos, se baseia em 3 fatores:

- Entrada da água da chuva no corpo do pavimento, de maneira distribuída ou localizada. O primeiro caso ocorre em pavimentos porosos infiltrantes. Já o segundo, ocorre através de drenos laterais ou bocas de lobo.
- Estocagem temporária da água nos vazios que ficam no interior da camada reservatório do pavimento (sub-base);
- Retardo da evacuação da água através da infiltração da mesma no solo e/ou posterior liberação para a rede de drenagem.

É significativo salientar que, ambas classificações, apresentadas por Araújo et al (1999) e por Suzuki et al (2013) estão corretas, no entanto faz-se necessário apresentar uma classificação mais completa dos Pavimentos Permeáveis que consiste em sua composição e quanto à sua infiltração, discriminados a seguir.

- Quanto à sua composição:

a) Pavimentos de Asfalto Poroso ou Camada Porosa de Asfalto (CPA):

Tem uma composição similar ao pavimento convencional, porém sem a fração de areia fina, com diâmetro menor que 0,075mm, de graduação aberta (mesmo tamanho, praticamente).

O CPA é, segundo Bernucci et al (2010), uma mistura asfáltica usinada a quente que possui uma granulação aberta. Isso significa que possui agregados com tamanhos uniformes na sua composição, o que permite a formação de um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados e insuficiência de materiais finos (menores que 0,075mm) que serviriam para preencher esses vazios. Por isso, temos a formação de uma mistura com elevado volume de vazios, o que permitirá a passagem/percolação da água por eles tornando-o drenante.

Segundo a norma DNER-ES 386/99, a mistura asfáltica resultante do CPA deve ter de 18 a 25% de vazios, para que a água percole rapidamente pelo revestimento, seja armazenada ou infiltrada na sub-base e retarde a chegada da mesma aos dispositivos auxiliares de drenagem como as sarjetas. Isso permite uma maior aderência pneu-pavimento em dias chuvosos.

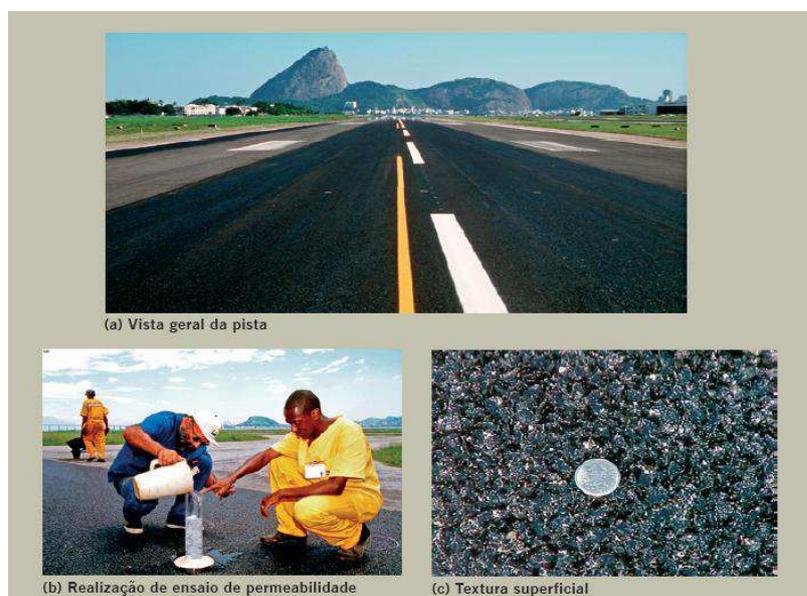
Bernucci et al (2010) salienta ainda que, essa mistura asfáltica reduz a espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento. Conseqüentemente teremos uma série de melhorias na questão da segurança como: redução das distâncias de frenagem, redução do spray de água proveniente do borrfio de água dos pneus pelos veículos, o que permite uma melhor visibilidade por parte do motorista.

Esses aspectos contribuem para a redução do numero de acidentes em dias chuvosos. Destaca-se também que a camada drenante do CPA é feita sobre uma camada densa e estrutural de pavimento/base. Esta deve ser necessariamente impermeável para evitar a entrada de água no interior do pavimento.

No Brasil, tem-se algumas obras em que foram utilizadas a camada porosa de atrito. São elas:

Aeroporto Santos Dumont – RJ: 1999. Pista principal do aeroporto teve uma camada de CPA (Figura 1) executada sobre o pavimento superposto nos 923m centrais. O coeficiente mínimo de atrito no ano da construção era de 0,61 μ m. Quatro anos depois, a camada de CPA teve que ser renovada nos pontos de maior uso para que o coeficiente inicial fosse mantido. Isso ocorreu, pois houve o processo de colmatção dos vazios e perda da capacidade drenante do pavimento ao final de 6 anos (Bernucci, et al, 2010).

Figura 1 - Aspectos da CPA no Aeroporto Santos Drummond – RJ



Fonte: Bernucci et al. 2010

b) Pavimento de Concreto Poroso

Segundo Marchiori (2011) o concreto permeável ou poroso possui permeabilidade que varia entre 15% a 30%, e a água escoar com taxas que variam entre 0,2 até 1 cm/s dependendo do material e de sua disposição. Na figura 2, apresenta uma imagem desse pavimento.

Figura 2 - Vista de um pavimento de concreto poroso



Fonte: PINI (2011)

Ferguson (2005, *apud*. Virgiliis, 2009), afirma que esse tipo de pavimento não deve ser aplicado sobre um fraco subleito, haja vista que a movimentação da estrutura como um todo pode ocasionar trincas. Possui sutil diferença para o Cimento Portland na medida em que no Concreto Poroso, os agregados possuem graduação aberta, o que gera uma placa uniforme e rígida ao ser aplicada no pavimento.

Como os outros revestimentos permeáveis (exceção do CPA que suporta altas solicitações), este é confeccionado visando suportar baixas e médias solicitações de tráfego. Sendo excelente o seu uso em calçadas, áreas de estacionamentos residenciais e comerciais, bem como ruas, quadras poliesportivas, ciclovias entre outros.

Seguindo as normas americanas, atestam que em 72 horas a água armazenada por esse pavimento é absorvida e lançada no aquífero, nos casos em que o solo é propício. Em casos de solos compactos e impermeáveis (solos argilosos), a água que fica na base e sub-

base notadamente não conseguirá ir para o lençol freático, ficando retida então no reservatório granular de modo que essa água transbordará pela superfície, retornando para a parte superior do concreto poroso.

c) Pavimento de Blocos de Concreto Vazado

Virgiliis (2009) ratifica que são blocos de concreto vazados e preenchidos com gramíneas ou agregados miúdos. São implantados lado a lado, resultando numa superfície que lembra uma grelha ou um desenho simétrico em ângulo reto ou diagonal (Figura 3).

Não são relativamente econômicos haja vista ser ainda pouco fabricado pelas empresas, porém tem vida útil boa e são duráveis, além da maior parte suportar bem a carregamentos de altas solicitações.

Virgiliis (2009) destaca ainda que, segundo as normas ABNT NBR 9780/87 e NBR 9781/87, as peças em concreto para serem executadas de forma satisfatória e adquirir boa resistência a compressão devem ter resistência de no mínimo 25Mpa além de trabalharem unidas em suas bordas. É significativo ressaltar que são ótimos em termos de condução hidráulica e porosidade.

Figura 3 - Pavimento de Concreto Vazado Preenchido com Gramínea



Fonte: Marchioni (2011)

d) Pavimento de Blocos Intertravados de Concreto

Pinto *apud* Virgiliis (2009) salienta que esse tipo de pavimento pode ser aplicado a todos os tipos de tráfego, seja ele, leve, médio ou pesado. Porém, isso implicará em algumas diferenças em relação a espessura e resistência a compressão dos blocos de modo que, quanto

maior for a solicitação a que esse pavimento estiver submetido, maior será a espessura do bloco e conseqüentemente, maior deverá ser a sua resistência e preço.

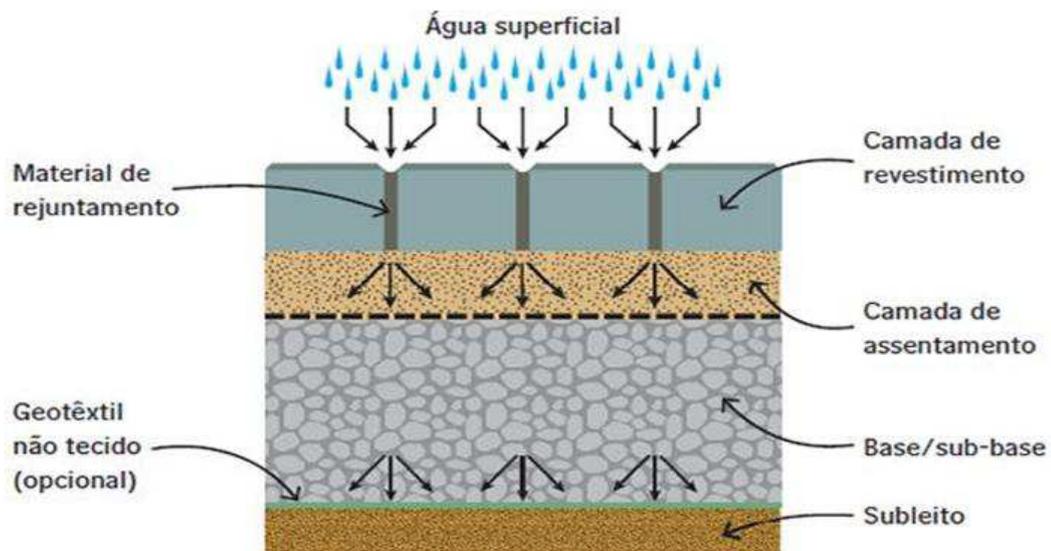
Para que esse tipo de pavimento não se solte ao ser assentado, é necessário um travamento lateral para que as peças não sofram tensões.

É significativo destacar que, um colchão de areia servirá como camada de assentamento, o que permitirá ao conjunto maior permeabilidade e porosidade. Além disso, temos um bom custo x benefício ao escolher esse tipo de pavimento com um custo relativamente baixo, como salienta Virgiliis (2009).

O que diferenciará uma placa de um bloco de concreto é a sua relação comprimento/espessura. Se for menor que 4, temos peças de concreto para pavimento intertravado. Se for maior que 4 temos placas planas de concreto (Marchioni, 2011).

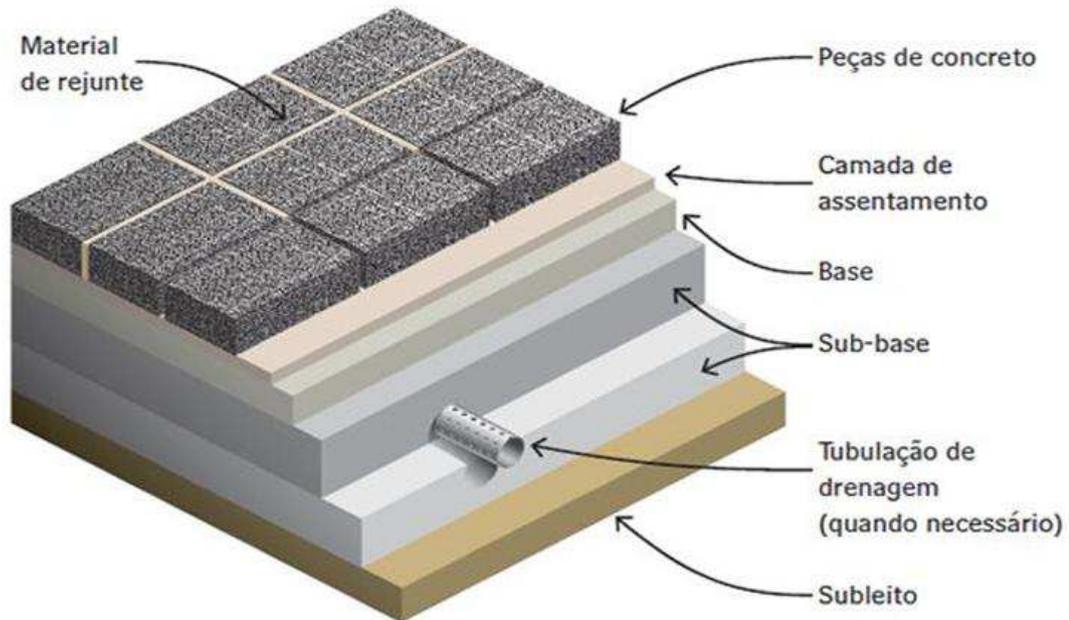
A seguir apresenta-se na Figura 4 a seção tipo de pavimento intertravado permeável e na Figura 5 o detalhe desse pavimento.

Figura 4 - Seção Tipo de Um Pavimento Permeável.



Fonte: Marchioni (2011)

Figura 5 - Seção Tipo de Um Pavimento Permeável.



Fonte: Marchioni (2011)

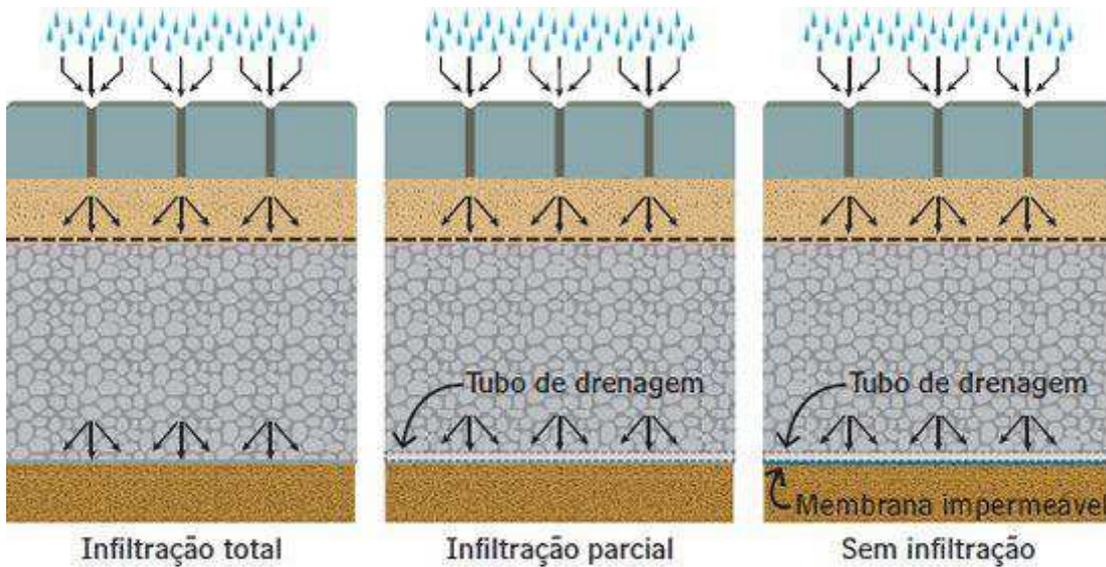
A seção tipo da figura anterior mostra as camadas desse revestimento: camada de assentamento, base e sub-base, tubulação de drenagem, e subleito.

De acordo com Marchioni (2011), a camada de assentamento é de material granular e tem espessura de 50mm. Sua função é fornecer uma superfície uniforme para o assentamento das peças de concreto pré-moldadas. A base e sub-base devem ser dimensionadas para cada caso, assim como a necessidade ou não do uso da tubulação de drenagem nessa camada.

- Quanto à sua Infiltração:

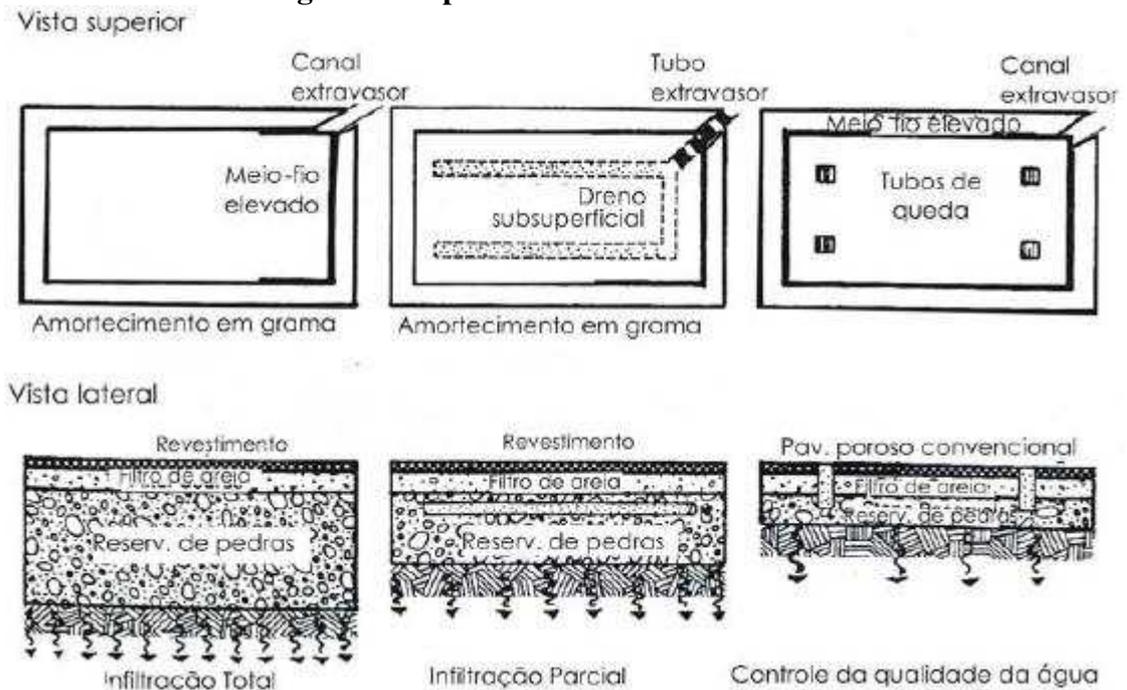
Segundo Schuler (1987, *apud* Virgiliis, 2009), os pavimentos permeáveis podem se encaixar em três categorias. São elas: Sistemas de Infiltração Total, Sistemas de Infiltração Parcial e Sistemas de Infiltração para controle da qualidade da água, conforme mostra na Figura 6.

Figura 6 - Tipos de Infiltrações dos Pavimentos Intertravados.



Fonte: Marchioni (2011)

Figura 7 - Tipos de Pavimentos Permeáveis



Fonte: Acioli (2005)

- **Sistemas de Infiltração Total:** Possui como único meio de saída a infiltração da água no solo. Nesse tipo de sistema, o dimensionamento da base e sub-base deve ser capaz de armazenar o volume da chuva de projeto menos o volume que é infiltrado

diretamente. Assim, temos um controle total da descarga de pico, do volume e da quantidade de água para todos os eventos de chuva menor ou igual a de projeto.

- **Sistemas de Infiltração Parcial:** São os casos em que o subleito não possui uma alta taxa de infiltração. Nesse caso, se faz necessário o uso de um sistema de drenagem para coletar a água que deixa de ser infiltrada no solo. Deve ser instalado um sistema de drenagem enterrado, que são tubos perfurados e espaçados regularmente que se localizam na parte superior do reservatório de pedras que fica na base/sub-base.
- **Sistema de infiltração para controle da qualidade da água:** Esse sistema é utilizado apenas para coletar o fluxo inicial da chuva, que é a que contém a maior concentração de poluentes, como é o caso da poluição difusa dos detritos espalhados aleatoriamente por toda bacia hidrográfica e coletados para o sistema. Os volumes em excesso não são tratados pelo sistema, sendo transportados pelos drenos para um coletor de água pluvial.

Acioli (2005) salienta que os pavimentos permeáveis podem receber contribuição de outros locais como telhados, ou outras áreas impermeáveis. Nesse caso, antes da água dessas contribuições escoarem no pavimento, ela deve ser pré-tratada a fim de remover os sedimentos, óleos e partículas em suspensão para evitar o entupimento do pavimento, processo chamado de colmatação.

3.3 Princípio de funcionamento dos pavimentos permeáveis.

Virgiliis (2009) assegura que a estrutura do pavimento permeável não é muito diferente dos pavimentos clássicos, tendo em sua composição geralmente brita e ligante (no caso do CPA). Eles são constituídos por vazios, que é o que caracteriza essa permeabilidade. Por isso, o volume de vazios é importante na determinação da capacidade de armazenamento.

O contato da estrutura do pavimento com o subleito deve ser feita com o uso de mantas geotêxteis adequadas, visando assegurar a não colmatação da estrutura, garantindo assim sua função de infiltração.

Quando se objetiva a estanqueidade, como acontece quando se utiliza reservatórios, o contato da estrutura com o subleito não deve ocorrer. Para isso, utiliza-se de

geomembranas ou lençóis plásticos de espessura adequada a fim de impedir a infiltração da água.

Febestral (2005, *apud* Virgiliis, 2009) afirma ainda que para que seja válido o uso de pavimentos permeáveis em blocos, as diferentes camadas da estrutura devem ser drenantes na mesma proporção ou capacidade para que seja compatível com a permeabilidade do subleito.

3.4 Componentes dos Pavimentos Permeáveis

Virgiliis (2009) afirma que os pavimentos porosos são constituídos pelos componentes detalhados a seguir:

- a) Revestimento, base e sub-base
- b) Sobrecamada
- c) Reservatórios
- d) Geotêxteis
- e) Geomembranas

3.1.1 Revestimento, base e sub-base

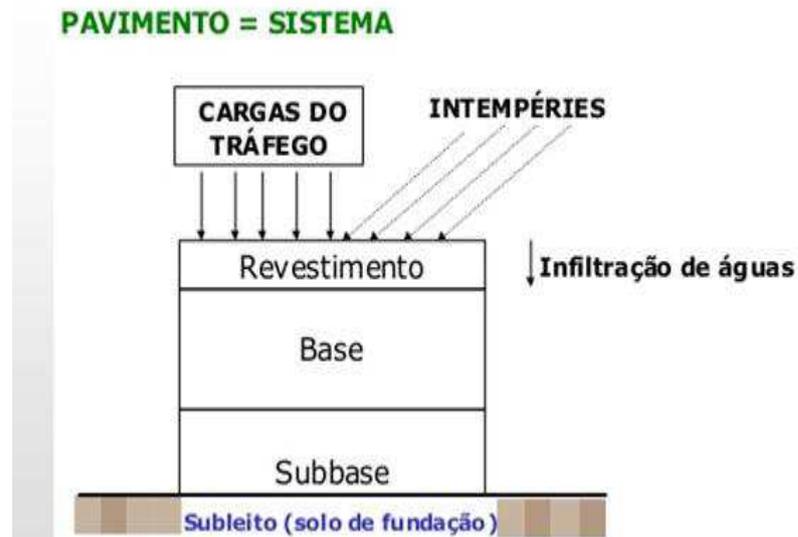
Sabe-se que o revestimento é a camada do pavimento que recebe diretamente o carregamento de tráfego que será transmitido às camadas inferiores. É usualmente mais caro, por ser constituído de material resistente ao desgaste das intempéries.

A camada de base, como afirma Virgiliis (2009) é o que vai atribuir espessura à estrutura do pavimento e distribuir o carregamento sobre o subleito (camada adjacente). Podemos adicionar uma segunda camada de sub-base, em casos que o pavimento precise ser aumentado de espessura ou para o armazenamento de água como acontece com os pavimentos permeáveis.

Nos pavimentos impermeáveis, isso não acontece visto que a água não pode infiltrar na estrutura ou no subleito mesmo que a base seja constituída de material poroso. A

superfície impermeável inviabiliza o funcionamento de um pavimento poroso (Virgiliis, 2009). A seguir apresenta-se uma seção de pavimento permeável contendo as camadas descritas anteriormente.

Figura 8 - Camadas de Um Pavimento



Fonte: Virgiliis, 2009.

3.1.2 Sobrecamada

Entende-se como qualquer camada de revestimento aplicada sobre qualquer tipo de pavimento preexistente (VIRGILIIS, 2009). Tem como objetivo drenar o escoamento superficial, melhorar a visibilidade, aumentar a aderência e reduzir o barulho e o reflexo. Isso confere mais segurança às rodovias, aumenta a capacidade de transporte e diminui os custos. Temos como sobrecamada porosa o CPA (Camada porosa de atrito), já mencionado anteriormente.

Figura 9 - Estrutura do Pavimento com Sobre-camada Porosa



Fonte: Virgiliis (2009)

3.1.3 Reservatórios

Também chamados de Colchão Drenante, é a estrutura responsável pelo armazenamento e transporte da água drenada diretamente para o solo ou para o exutório através de um tubo de drenagem.

A água armazenada no pavimento é eliminada lentamente por meio de tubos laterais, fazendo com que o pico de cheia seja retardado. Como consequência, temos a redução da erosão, e dos custos das estruturas dos sistemas de drenagem nos dispositivos a jusante.

Para a estrutura armazenadora com funções hidráulicas em certa camada do pavimento, Virgiliis (2009) dá o nome de “Reservatório de Base”. Este poderá ser drenado por tubos em qualquer altura da base, dividindo-a em dois segmentos. Um será responsável pelo escoamento da água sobressalente de dentro do reservatório para a parte exterior da estrutura. O outro, localizado abaixo daquela será responsável pela retenção da água para infiltração. É significativo destacar que, ambos os segmentos tem função estrutural, sendo o de baixo também com função hidráulica.

Araújo et al. (1999) afirma que a capacidade de armazenamento dos pavimentos porosos é determinada pela profundidade do reservatório de pedras que segundo ele, deve ser feita com brita nº3 ou nº4.

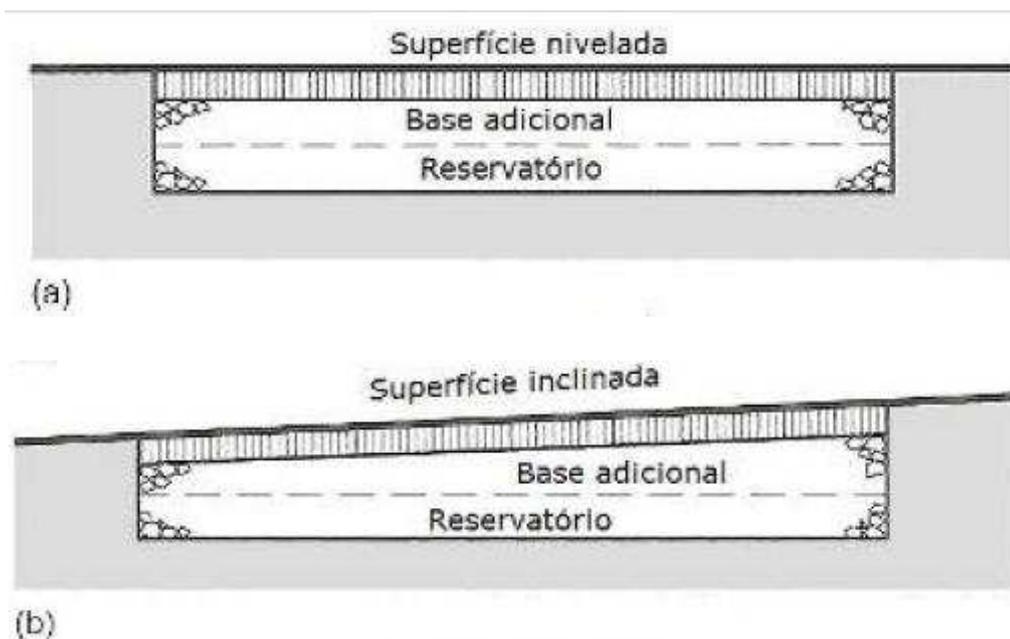
Virgiliis (2009) descreve dois tipos de reservatórios, os nivelados ou inclinados e os com saída lateral.

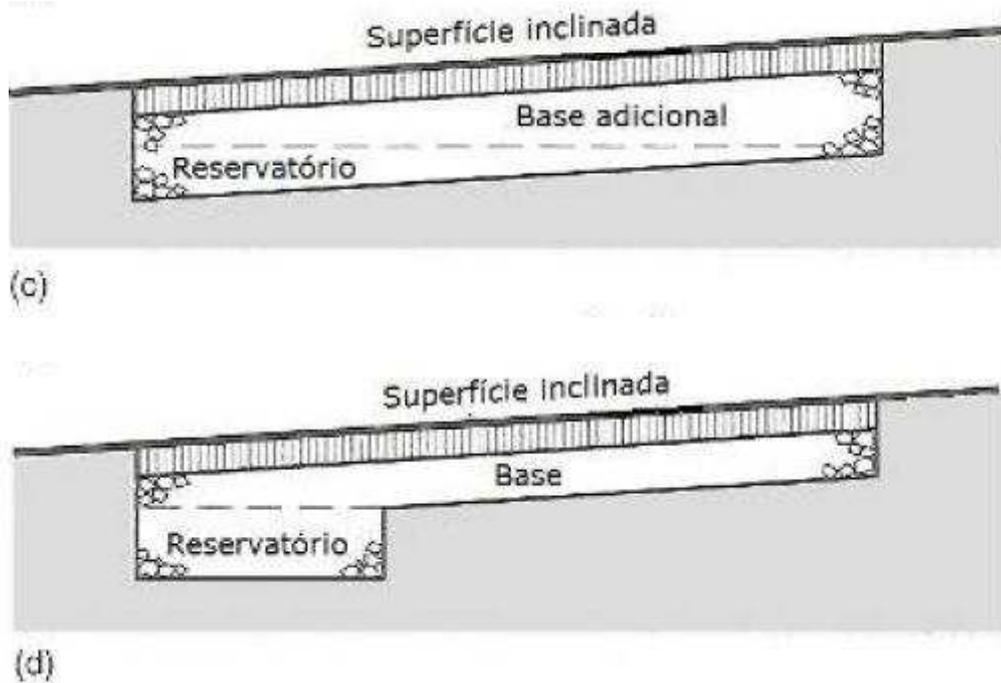
3.1.3.1 Reservatórios Nivelados ou inclinados

Em superfícies niveladas, o reservatório será uma camada horizontal logo abaixo da base. Já em superfícies inclinadas, pode haver a necessidade de uma camada adicional para compensar essa inclinação. Desse modo, a água tende a se movimentar para o ponto mais baixo do reservatório limitando a capacidade do mesmo. Por isso, como forma de compensação, a base do ponto mais baixo poderá ser maior do que a base do ponto mais alto, visando o aumento de armazenamento no ponto de maior volume.

A Figura 10 mostra como a inclinação ou a falta dela, atua na configuração do reservatório.

Figura 10 - Pavimentos com Reservatórios em Nível ou Inclinados





Fonte: Virgiliis (2009)

3.1.3.2 Reservatórios com saída lateral

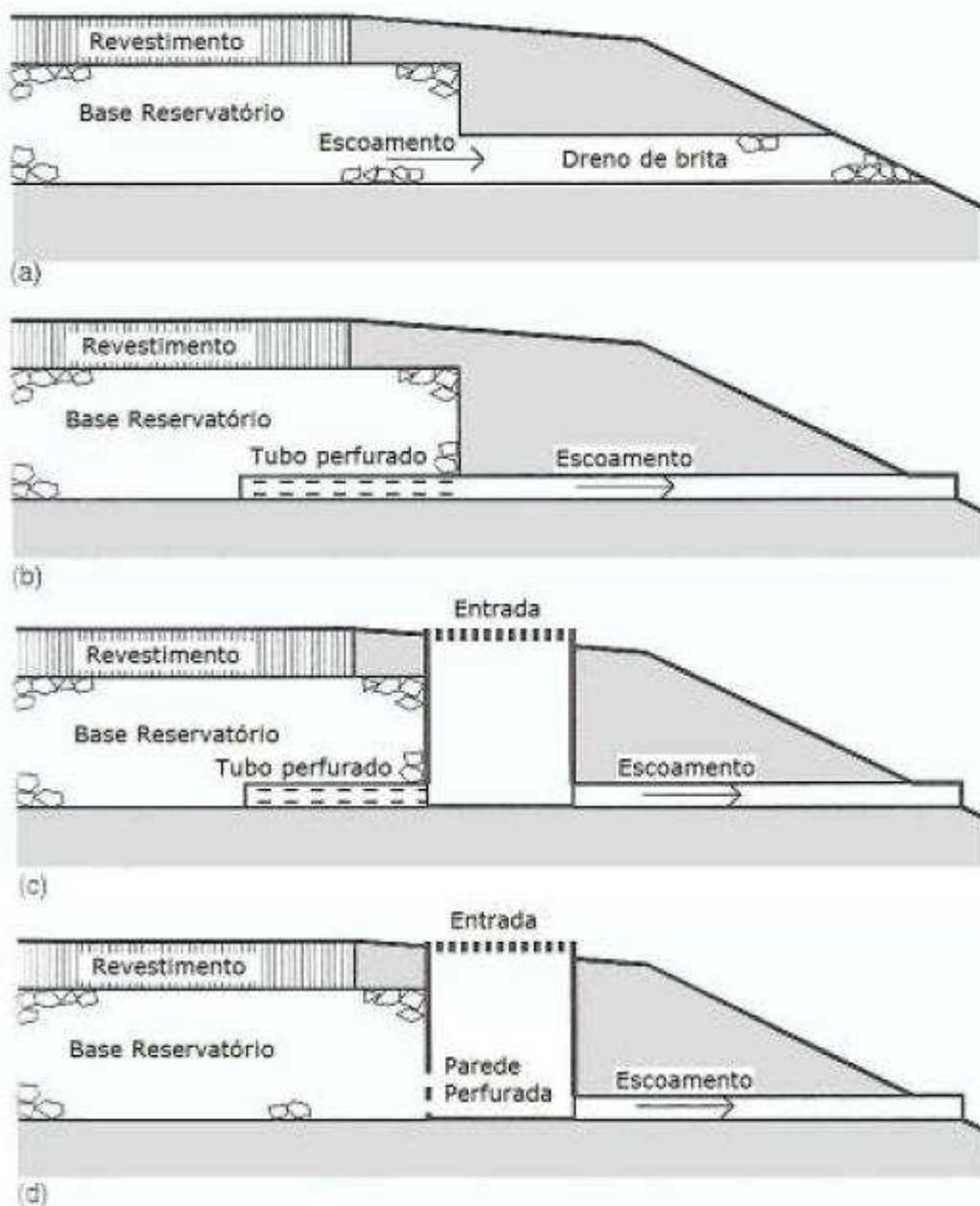
Em solos que não são totalmente permeáveis, faz-se necessário o uso de tubos laterais para ajudar no escoamento da água. Segundo Virgiliis (2009), eles atuam também limitando a profundidade e o tempo de retenção da água na estrutura superior do pavimento.

Para a implantação de dispositivos de saída na camada inferior do reservatório temos vários arranjos possíveis como mostra a Figura 11.

Os drenos laterais, evitam que a água seja absorvida pelo subleito ao dirigi-las para as laterais em quase sua totalidade.

As águas captadas pelo reservatório são desviadas para as laterais através de drenos granulares (a), tubos perfurados (b) e (c) com ou sem uma estrutura que permita o monitoramento ou manutenção como sugere a Figura 11.

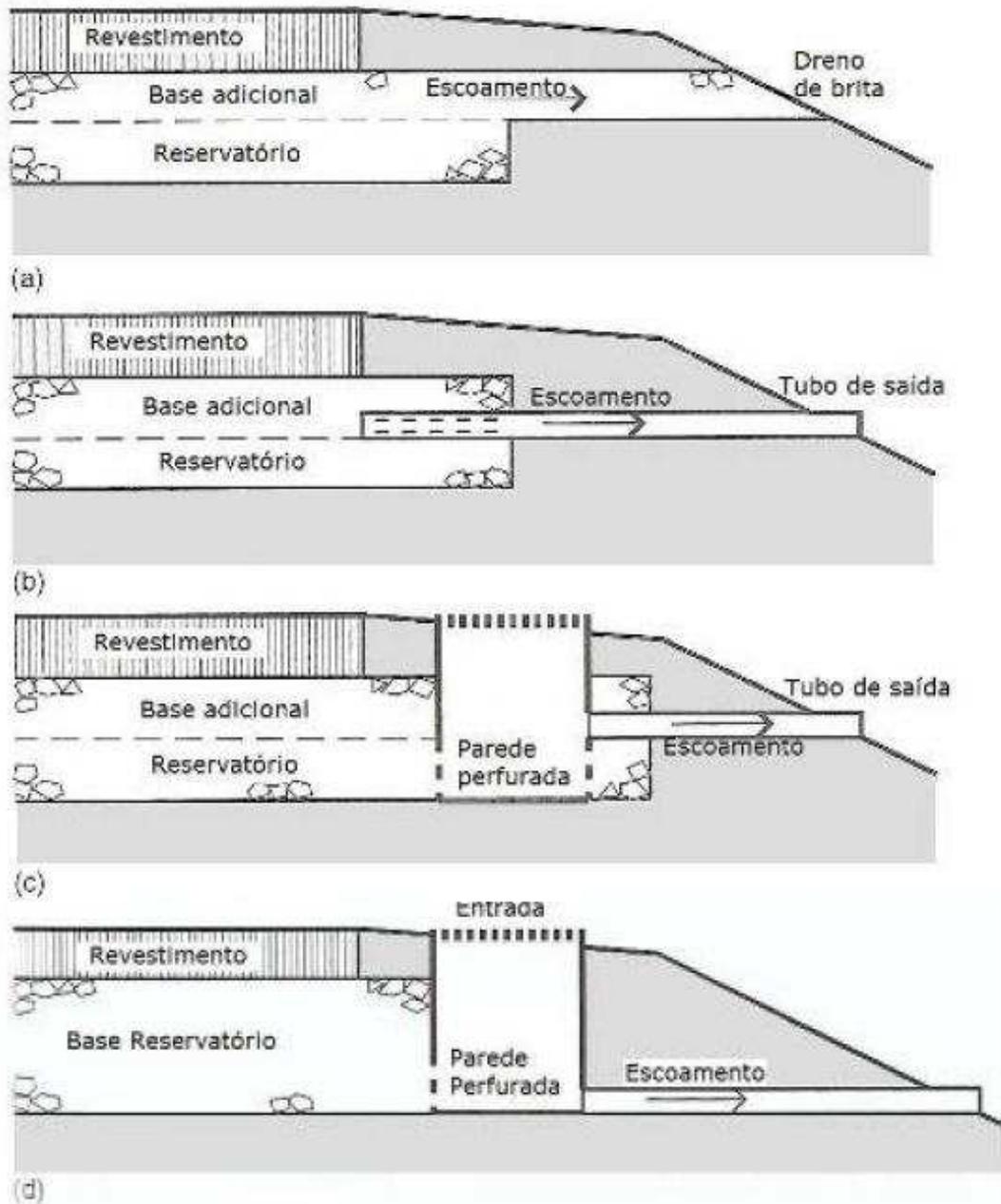
Figura 11 - Exemplos de Dispositivos Laterais Localizados na Camada Inferior da Base do Reservatório.



Fonte: Virgiliis (2009)

Também temos dispositivos de saída para o excesso de água retida no interior do pavimento. Abaixo do tubo de saída lateral, temos um reservatório que retém a água que infiltra para o subleito (figuras a, b e c). Outra opção economicamente atraente, é a da figura (d) que mostra trincheiras de infiltração construídas longitudinalmente.

Figura 12 - Exemplos de Dispositivos de Descarga Lateral Localizados na Parte Superior da Base do Reservatório



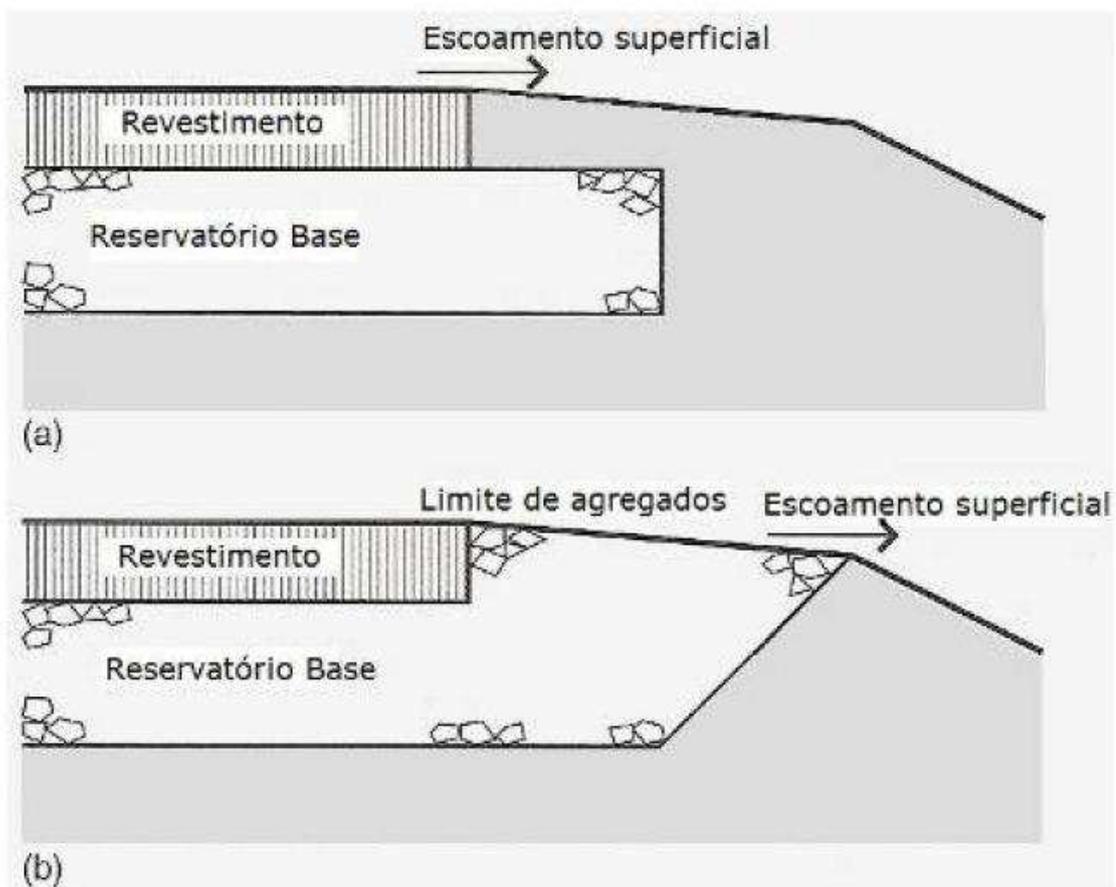
Fonte: Virgiliis (2009)

Quando a água excede a capacidade de armazenamento do reservatório ou quando a taxa de infiltração do solo é baixa fazendo com que ele demore para absorver a água do pavimento, torna-se necessário também um dispositivo de saída lateral para o escoamento

superficial pela própria inclinação do terreno-figura (a) - em casos que o tráfego possui baixa sollicitação.

Para que a superfície do revestimento fique protegida do excesso de água do reservatório que eventualmente pode extravasar, a execução de uma camada granular aflorante faz-se necessário como bem sinaliza a figura (b).

Figura 13 - Dispositivos que Permitem escoamento superficial e Protegem o Pavimento



Fonte: Virgiliis (2009)

3.1.4 Geotêxteis

Virgiliis (2009) afirma que “Trata-se de uma manta não-tecida de filamentos de polipropileno que possibilita a livre passagem das águas de infiltração para o meio drenante ou camada adjacente”. É aplicado entre camadas (da base e sub-leito, por exemplo) para

separação dos seus materiais, o que mantém a porosidade pois evita o carreamento de partículas para a camada adjacente mantendo assim a integridade estrutural das camadas.

Outra forma alternativa para a separação desses materiais é a utilização de materiais de tamanho intermediário. Os geotêxteis são permeáveis, e atuam como filtros.

3.1.5 Geomembranas

Nada mais são do que extensos lençóis de plásticos resistentes, trata-se de um tecido impermeável geralmente de plástico ou PEAD (Polietileno de Alta Densidade).

São utilizados em pavimentos porosos que necessitam ter sua parte inferior revestida a fim de evitar o escoamento de água para o subleito. A geomembrana impede que materiais tóxicos presentes no solo contaminem as águas do meio ambiente (lençóis freáticos).

Virgiliis (2009) afirma que pavimentos cuja camada inferior da base são revestidas por geomembranas possuem função hidráulica de retenção e tratamento das águas somente, não cabendo aqui infiltrações.

Figura 14: Reservatório Revestido com Geomembrana



Fonte: Revista Engenharia Edição 547 (2001)

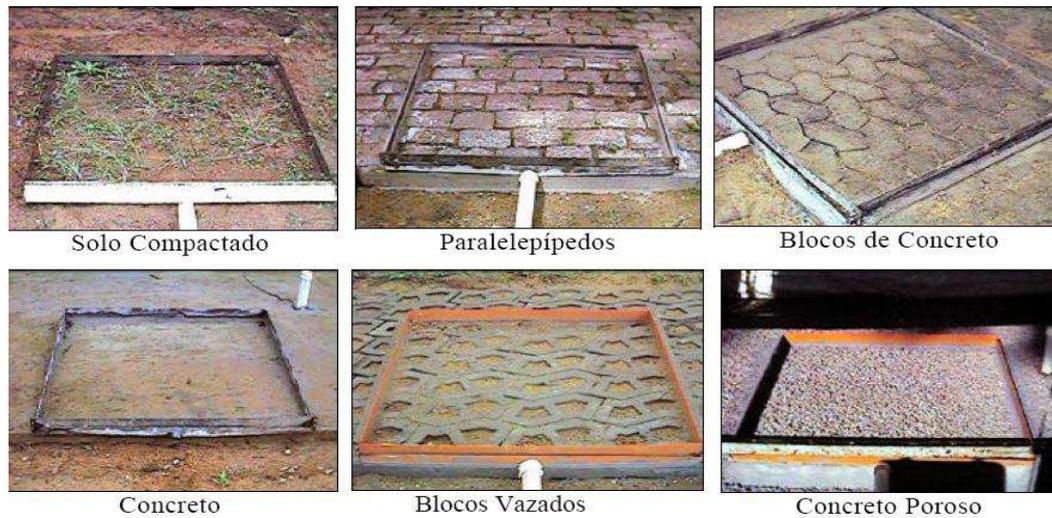
3.5 COMPARAÇÃO ENTRE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E TRADICIONAL

Araújo et al. (1999) realizou um experimento para avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. Esse estudo consistiu na simulação de chuvas na área do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) sobre diferentes tipos de superfícies (Solo Compactado, Pavimentos Impermeáveis, Pavimentos Semi-Permeáveis, Pavimentos Permeáveis – Blocos de Concretos Vazados e Concreto Poroso) (Figura 15).

O objetivo disso é determinar o escoamento e a taxa de infiltração do solo para relacioná-la com a dinâmica da água em parcelas e bacias maiores. Com isso, tem-se um melhor conhecimento dos processos básicos de escoamento em diversas situações (espaço e tempo) o que permitirá a comparação da eficácia dos pavimentos permeáveis em relação aos outros tipos de coberturas na redução do volume de água de um escoamento superficial gerado por um determinado evento de chuva.

As superfícies estudadas por Araujo et al. (1999) foram:

- Solo compactado com declividade de 1 a 3%;
- Pavimentos Impermeáveis: concreto convencional de cimento, areia e brita com 4% de declividade;
- Pavimentos semi-permeáveis: uma parte de superfície com pedras regulares de granito com areia nas juntas (paralelepípedos) com 4% de declividade; Outra parte revestida de blocket com 2% de declividade e juntas de areia;
- Pavimentos Permeáveis: uma parte de concreto poroso e outra de blocos de concreto com orifícios verticais preenchidos com areia. Ambos com 2% de declividade;

Figura 15 - Pavimentos Simulados

Fonte: Araújo et al. (2009)

As chuvas de projeto foram simuladas com uma duração de 10 min, período de retorno de 5 anos e intensidade de 111,9 mm/h.

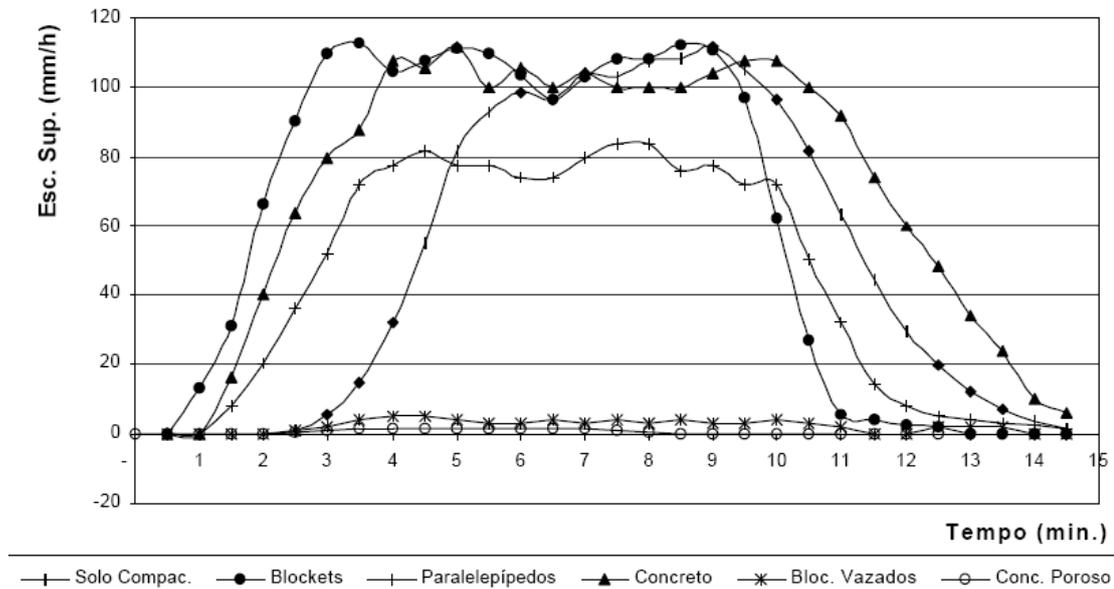
Abaixo tem-se os resultados das simulações de chuvas obtidas por Araújo *et al* (1999).

Tabela 1 - Resultados das Simulações nas Superfícies Discriminadas

| | Solo Com- compactado | Concreto | Bloco de Concreto | Paralelepípedo | Bloco Vazados |
|--|-------------------------|----------|----------------------|----------------|------------------|
| DATA | 03/06/98 | 28/10/98 | 29/07/98 | 13/10/98 | 27/01/99 |
| Hora Início | 14:06 | 15:15 | 15:20 | 11:20 | 10:08 |
| Intensidade simulada (mm/h) | 112 | 110 | 116 | 110 | 110 |
| Chuva total (mm) | 18,66 | 18,33 | 19,33 | 18,33 | 18,33 |
| Escoamento total (mm) | 12,32 | 17,45 | 15,00 | 10,99 | 0,5 |
| Coefficiente de escoamento | 0,66 | 0,95 | 0,78 | 0,60 | 0,03 |
| Umidade inicial do solo (cm ³ /cm ³) | 32,81 | 32,73 | 32,71 | 32,72 | 32,24 |

Fonte: Araújo et al. (1999)

Figura 16: Escoamento Superficial nas Superfícies Ensaçadas



Fonte: Araújo et al. (1999)

Araújo et al. (1999) observou nas simulações no módulo de concreto (1m²) que o coeficiente de escoamento nesse pavimento foi 44% maior do que no solo compactado. Isso mostra que praticamente toda chuva gerou escoamento.

Nas simulações nas superfícies semi-permeáveis, o escoamento superficial também começa imediatamente após o início da chuva porém os volumes gerados são menores que os do concreto.

Nas simulações nas superfícies em forma de paralelepípedos, o coeficiente de escoamento é menor até do que o do solo compactado: no pavimento de concreto obteve-se um coeficiente 22% maior e no paralelepípedo 11% menor que o solo compactado. Isso não garante que haja manutenção nas condições de pré-desenvolvimento do solo, porém há uma significativa redução se o compararmos aos pavimentos impermeáveis.

O uso desse tipo de pavimento em áreas urbanas pode contribuir para o controle da geração de escoamento superficial se instalados em substituição a pavimentos impermeáveis. Porém em relação a áreas ainda não ocupadas, pode-se ter um aumento do escoamento superficial.

Na simulação de chuva nos pavimentos permeáveis Araújo *et al* (1999) observou que não se teve quase escoamento superficial. Isso nos sinaliza que esses dispositivos são altamente recomendados para o controle de escoamento dos volumes, pois conseguem manter as condições originais de escoamento superficial ou até mesmo reduzi-los a praticamente zero.

3.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS

A utilização de Pavimentos Permeáveis nos possibilita observar algumas vantagens e desvantagens apresentadas a seguir:

- Melhoria na segurança e conforto, pois Marchioni (2011) afirma que há redução na formação de poças d'água e conseqüentemente temos uma melhora na aderência carro-pavimento;
- Se o pavimento poroso/permeável for de infiltração, Marchioni (2011) destaca para o possibilidade dele servir como recarga de lençóis subterrâneos;
- Pinto (2011), afirma que esse tipo de pavimento reduz de forma significativa o escoamento superficial, proporcionando o amortecimento dos picos de cheia já que o tempo de concentração da bacia aumenta;
- Controle do processo erosivo do solo;
- Ocorre a melhoria da qualidade das águas, no caso de utilização de pavimentos porosos pois esses poros servem como filtro do corpo do pavimento;
- Observamos uma redução das dimensões do sistema de drenagem de jusante, o que possibilita segundo Marchioni (2011) um benefício financeiro. Em outras palavras, tem-se uma economia devido a eliminação ou redução do uso de guias e sarjetas e de sistemas de drenagem;
- Custos similares ao do pavimento convencional, segundo Pinto (2011).

Dentre as desvantagens podemos destacar:

- Possibilidade de contaminação do lençol freático, pois tem-se no solo a poluição difusa;
- A eficiência do pavimento precisa ser verificada com uma certa periodicidade que varia de autor para autor;
- A execução do pavimento deve ser feita por mão de obra qualificada afim de prevenir a obstrução precoce do pavimento (colmatação);
- Lavagem a vácuo como forma de manutenção do pavimento;
- Collins (2007, *apud* Pinto, 2011), afirma que em caso de obstrução do pavimento, sua reabilitação é cara e difícil.

Até então é observado mais vantagens do que desvantagens para o uso desse tipo de pavimento. É significativo destacar que quanto mais ele for usado, maior será a qualidade da execução da técnica, e melhor será seu custo-benefício.

3.7 SUSTENTABILIDADE DESSE TIPO DE PAVIMENTO

O uso dos pavimentos permeáveis é considerado uma BMP (Best Management Practice) que são praticas utilizadas com o intuito de melhorar a qualidade das águas pluviais provenientes da poluição difusa. (TOMAZ, 2009).

Esta é causada pela poluição nos lotes e ruas que são lançadas nos cursos d'água. O objetivo das práticas sustentáveis é evitar que essa agua poluída chegue aos córregos e rios.

Como exemplo de BMPs, usadas abundantemente em países de primeiro mundo, temos o uso de trincheiras de infiltração, filtros de areia, reservatórios de infiltração e detenção entre outros. (TOMAZ, 2009)

Schueler (1987, *apud* Pinto, 2011) afirma que os pavimentos permeáveis podem promover a recarga do lençol freático e a melhora de forma significativa da agua infiltrada no subsolo. Porém ele afirma que há uma possibilidade desprezível de ocorrer contaminação do lençol freático. Pinto (2011) alerta por sua vez, que mesmo sendo desprezível, é uma consequência significativa, pois a contaminação vai depender das condições de uso do solo que variam de acordo com o local, e da profundidade do lençol freático.

Outro fator que torna esse pavimento sustentável, segundo Marchioni (2011) é o fato dele evitar o escoamento superficial (que é uma das causas de inundações) garantindo que praticamente 100% da água seja infiltrada através de sua estrutura podendo ser infiltrada no solo ou ser transportada através de sistemas auxiliares de drenagem. Há ainda a possibilidade dessa água ser armazenada e utilizada para lavar calçada, por exemplo.

Esses e outros fatores já citados anteriormente, tornam os pavimentos permeáveis sustentáveis, e também faz com que eles se tornem um amenizador de inundações urbanas desde que aliados a outras BMPs.

Os pavimentos permeáveis são vistos como uma das soluções sustentáveis para a drenagem urbana, haja vista que atua reduzindo a impermeabilização das cidades assim como reduzindo a poluição pois a base do pavimento filtra a água da enxurrada.

Em países como os EUA, por exemplo, Marchioni (2011) afirma que em alguns casos, a legislação exige a utilização deste tipo de pavimento.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS DOS ENSAIOS

Esta metodologia tem o objetivo de verificar se o subleito do estacionamento do prédio de Engenharia Civil da UEMA possui o CBR e Expansão adequados para receber um pavimento permeável do tipo Intertravado. Após essa verificação, será proposto um dimensionamento para o mesmo (Capítulo 7) com base na literatura. Para isso, necessitamos da realização de alguns ensaios nas camadas do subleito a fim de verificar a sua permeabilidade, e sua capacidade de suporte. Por isso, fizemos uso do ensaio CBR ou ISC, e do ensaio de permeabilidade. Segue no Anexo 1 os ensaios de caracterização do solo que auxiliaram no presente estudo (limite de plasticidade, limite de liquidez, e granulometria).

O ensaio CBR é regulamentado pela norma brasileira ABNT NBR 9895 – Solo: Índice de Suporte Califórnia.

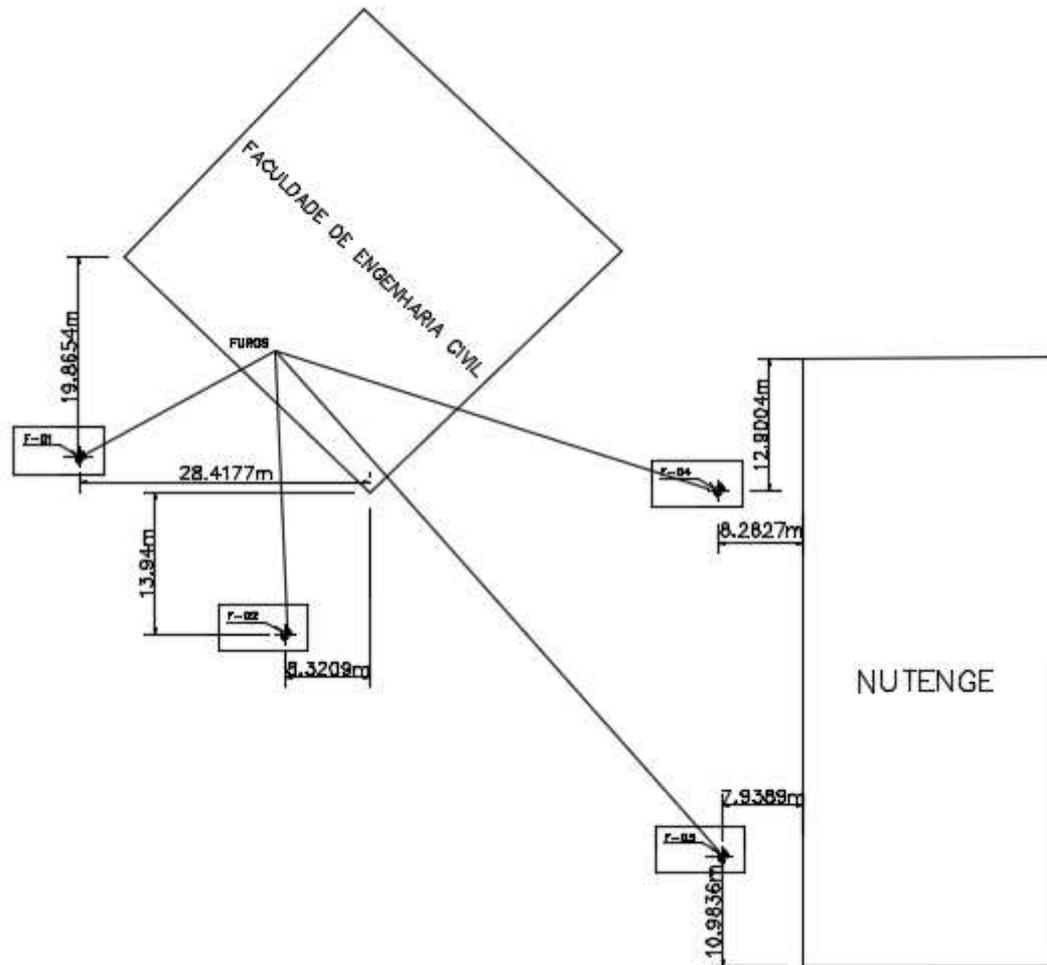
O ensaio de Permeabilidade é regulamentado pelas normas brasileiras NBR 13292 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante – Método de ensaio ou NBR 14545 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Para a determinação do coeficiente de permeabilidade, utilizou-se no presente estudo, o ensaio no Edômetro a carga variável haja vista que não foi possível a utilização do permeômetro.

Para essa verificação, Marchioni (2011) afirma que devemos fazer a execução de basicamente dois ensaios: Ensaio de Permeabilidade e Ensaio CBR.

Para isso, foram definidos quatro pontos no estacionamento para retirada de material a cerca de 60cm da superfície (subleito) visando a caracterização do mesmo. Foi retirado cerca de 30kg de material de cada “furo”.

Segue na Figura 17 um esquema com a localização dos furos, na figura 18 as imagens com os furos realizados em campo e na figura 19 as imagens das amostras:

Figura 17 - Esquema de Localização dos Furos



Fonte: Autora (2016)

Figura 18 - Furos Feitos no Estacionamento do CCT



Fonte: Autora (2016)

Figura 19 - Amostras Retiradas dos Quatro Furos para Realização dos Ensaios em Laboratório



Fonte: Autora (2016)

4.1 Ensaio de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade é originalmente feito no aparelho denominado permeômetro, porém esse aparelho não se encontra em funcionamento no laboratório desta universidade. Por isso, para a realização do ensaio foi utilizado o aparelho denominado Edômetro que é utilizado para o ensaio de adensamento, porém atendeu de maneira satisfatória o objetivo proposto que foi o de encontrar o coeficiente de permeabilidade do solo de forma experimental.

Para a realização do ensaio foram retiradas amostras indeformadas do subleito nos quatro furos determinados em planta. Desses quatro, apenas três seguiram para a realização do ensaio. Porém o ensaio de fato foi feito apenas com uma amostra, pois foi a única que conseguiu se manter intacta no anel utilizado no ensaio.

O ensaio consistiu em saturar o corpo de prova e após isso continuar enchendo-o de água através da bureta. A partir de então, enche-se a bureta com água e anota-se em quantos segundos essa água descia.

Com esses valores e alguns outros dados especificados nos itens a seguir, conseguiu-se obter o coeficiente de permeabilidade do solo.

4.1.1 Equipamentos

- Prensa devidamente equipada com a célula de adensamento (edômetro);
- Jogos de pesos para transmissão de pressão ao corpo de prova;
- Cronômetro para o acompanhamento dos tempos de leitura;
- Bureta que serviu como o canal para a saturação do corpo de prova;
- Anel de aço para extração da amostra indeformada.
- Pedra porosa

Figura 20 - Equipamentos Utilizados no Ensaio de Permeabilidade



Fonte: Autora (2016)

4.1.1 Preparação do Corpo de Prova

O corpo de prova, sem sofrer deformações, é talhado através do próprio molde cilíndrico usado na prensa. Instala-se o mesmo entre duas pedras porosas, no edômetro, como mostra nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Amostra Indeformada Retirada do Estacionamento do CCT - UEMA



Fonte: Autora (2016)

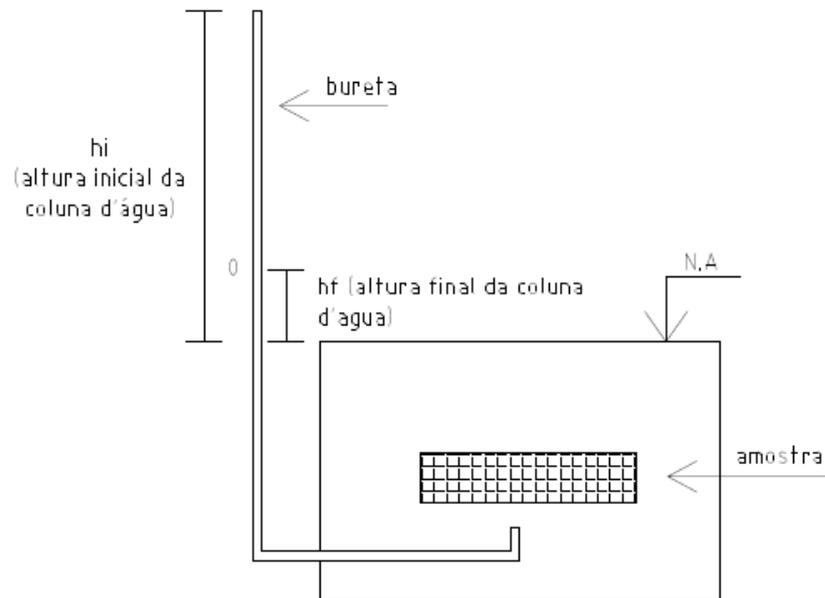
Figura 22 - Outra Vista da Amostra Indeformada Retirada do Estacionamento do CCT - UEMA



Fonte: Autora (2016)

4.1.1 Procedimento Experimental

Com o corpo de prova instalado no edômetro, começa-se o processo de saturação do mesmo. Em seguida, inicia-se a aferição dos tempos de queda d'água pela coluna da bureta. Foram medidos, seis tempos (t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5 , t_6) e em seguida feito os cálculos.

Figura 23: Esquema do Edômetro

Fonte: Autora (2016)

A água entra pela bureta, circula pelo corpo de prova (amostra) saturando-o e transborda.

Figura 24: Edômetro Saturado Depois da Realização do Experimento

Fonte: Autora (2016)

4.1.2 Cálculos e Resultados

Pinto (2002), afirma que no ensaio de permeabilidade à carga variável (o utilizado no presente estudo), devemos utilizar a fórmula abaixo para a determinação do coeficiente de permeabilidade.

$$K = 2,3 [(a*L)/(A*t)] \log(h_i/h_f)$$

Onde:

a = área da bureta ($3,87 \times 10^{-5} \text{ m}^2$)

L = espessura do corpo de prova (0,02045m)

A = área da amostra ($5,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) – corpo de prova de tamanho médio

t = tempo de queda da água pela bureta (s)

h_i = altura inicial da coluna d'água (189,66mm = 0,18966m)

h_f = altura final da coluna d'água (189,66 – 157 mm = 32,66mm = 0,03266m)

Aferindo os tempos e substituindo na fórmula acima, encontramos os seguintes valores:

Tabela 2 - Coeficiente Médio de Permeabilidade do Subleito do Estacionamento do CCT

| ENSAIO DE PERMEABILIDADE | |
|---------------------------------|---------------------------|
| TEMPO (s) | k (coef. Permeab.) |
| 12,42 | 2,24438E-05 |
| 14,38 | 1,93847E-05 |
| 16,2 | 1,72069E-05 |
| 12,65 | 2,20358E-05 |
| 14,36 | 1,94117E-05 |
| 13,54 | 2,05873E-05 |
| MÉDIA | 2,02E-05 |

Fonte: Autora (2016)

Segue abaixo uma tabela com valores de referência para o coeficiente de permeabilidade.

Tabela 3 - Valores Típicos de Coeficientes de Permeabilidade

| | |
|------------------|---------------------------|
| Argilas | $< 10^{-9}$ m/s |
| Siltes | 10^{-6} a 10^{-9} m/s |
| Areias argilosas | 10^{-7} m/s |
| Areias finas | 10^{-5} m/s |
| Areias médias | 10^{-4} m/s |
| Areias grossas | 10^{-3} m/s |

Fonte: Pinto, 2002

Analisando os valores de referência, observa-se que o valor médio encontrado de $k = 2,02E-05$ encaixa-se no de areias finas.

Para utilização de pavimentos permeáveis em solos poucos permeáveis, pode ser necessário a utilização de tubos de drenagem como forma de evitar a permanência da água por muito tempo na estrutura do pavimento, o que pode causar perda de suporte.

O valor encontrado é um valor médio, significa que o subleito do estacionamento é moderadamente permeável. Diz-se que ele está mais para permeável do que para impermeável, o que é um resultado significativo pois deseja-se que essa água seja absorvida pelo subleito se não em sua totalidade, pelo menos de maneira parcial.

4.2 Ensaio de Umidade do Solo

Esse ensaio é regido pela norma ABNT NBR 6457/86. A umidade do solo ou teor em água é definida como o peso da água contida em uma amostra de solo dividido pelo peso seco das partículas sólidas do solo, sendo expressa em porcentagem. Esse ensaio antecede ou é feito ao mesmo tempo que todos os outros realizados neste trabalho, com exceção do ensaio de permeabilidade. Logo, verifica-se a umidade do solo várias vezes haja visto que fizemos vários ensaios.

4.2.1 Materiais Utilizados

- Almofariz e mão geral recoberta de borracha;
- Balança de precisão;
- Cápsulas metálicas;
- Estufa.

4.2.2 Procedimento Experimental

O ensaio consiste em destorroar a amostra no almofariz e passa-la na peneira descrita na norma ABNT NBR 6457/86, em seguida coloca-se uma quantidade da mesma na cápsula metálica devidamente pesada, aferindo seu peso com a quantidade de solo e anota-se os respectivos valores.

Essa cápsula é colocada na estufa a 105° - 110°C por 24h para após isso pesar novamente para obter o seu peso seco e substituir os valores na fórmula abaixo:

$$h = [(\text{Peso úmido} - \text{Peso seco})/(\text{Peso seco} - \text{Peso cápsula})]*100$$

Onde:

h = Umidade em percentagem

Peso úmido = peso da capsula + solo úmido

Peso seco = peso da cápsula + solo seco

Peso cápsula = peso da cápsula (aferido antes).

4.2.3 Resultados

Os resultados das umidades encontradas nesse estudo, serão dadas nos itens subsequentes juntamente com o ensaio de CBR.

4.3 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação é regido pela norma ABNT NBR 7182/86 com o objetivo de determinar o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos quando compactados, de acordo com os processos especificados.

Experimentalmente, constata-se que a adição de água a um solo seco ou pouco úmido facilita a sua compactação de modo que a densidade final do material compactado tende a aumentar. Porém, isso não ocorre indefinidamente.

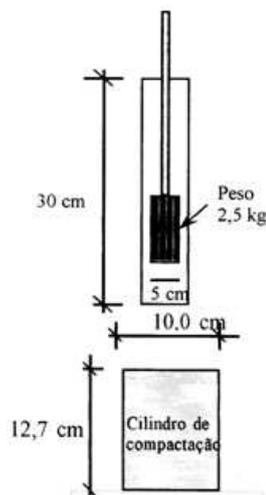
Sabe-se que essa densidade tende a aumentar até que o corpo de prova atinja a sua umidade ótima. A partir do momento em que a adição de água conduz a valores superiores ao da umidade ótima, o que se observa é o processo inverso, ou seja, a densidade do material compactado tende a diminuir.

Por isso, o ensaio de compactação é realizado com os objetivos de determinar a umidade ótima do solo, para uma dada energia de compactação; e determinar o peso específico aparente seco máximo (γ_{smax}) que se associa a essa umidade ótima.

4.3.1 Materiais Utilizados

- Bandeja metálica; Almofariz; Peneiras de 4,8mm e 10mm; Balança de precisão; Proctor; Cilindro de Compactação; Extrator; Cápsulas metálicas; Estufa.

Figura 25 - Equipamento de Compactação



Fonte: Pinto (2006)

4.3.2 Procedimento Experimental

Pinto (2006), afirma que inicialmente deve-se secar a amostra ao ar e destorroá-la.

A norma ABNT 7182/86, afirma que se a amostra após a preparação, passar integralmente na peneira #4,8mm, podemos utilizar o cilindro menor para a realização do ensaio.

Isso ocorreu com as amostras utilizadas nesse ensaio, e levando em consideração, que o tráfego no local é leve, pois se trata de um estacionamento onde será proposto a utilização de pavimento permeável intertravado, nesse ensaio utilizou-se o proctor com energia normal de compactação, recomendado para solos finos, o mesmo observado no estudo de caso desse estudo.

Inicia-se o ensaio segundo Pinto (2006), com um acréscimo de água que faça com que o solo fique com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. No ensaio, utiliza-se inicialmente 190g de água na primeira amostra, e 45g nas outras quatro amostras em todos os corpos de prova. Desse modo, inicia-se o ensaio com cerca de 6,5% de umidade e aumentou-se em 1,5% nas quatro amostras subsequentes. Com a umidade bem uniformizada, uma porção do solo é colocada num cilindro padrão (10cm de diâmetro e 12,7cm de altura) e submetida a 26 golpes (proctor normal) de um soquete com massa de 2,5kg que cai a uma altura de 30,5cm. A porção do solo compactado deve ocupar um terço da altura do cilindro. O processo repete-se por duas vezes, até que se atinja uma altura superior à do cilindro (o anel complementar que é acoplado ao cilindro permite que isso ocorra).

Raspa-se o excesso, com uma régua para acertar o volume e pesa-se obtendo o seu peso úmido.

Em seguida, o corpo de prova é levado ao extrator para ser retirado do cilindro, desfaz-se o corpo de prova e passa-se na peneira nº10. Após isso, coloca-se uma quantidade na cápsula metálica devidamente tarada e afere-se seu peso úmido para que seja colocado na estufa a 105°C por 24h e retirada a sua umidade.

Determina-se o peso específico e aumenta-se a umidade em cerca de 2% para que o processo seja repetido. Para-se quando o peso úmido cai pelo menos duas vezes consecutivas.

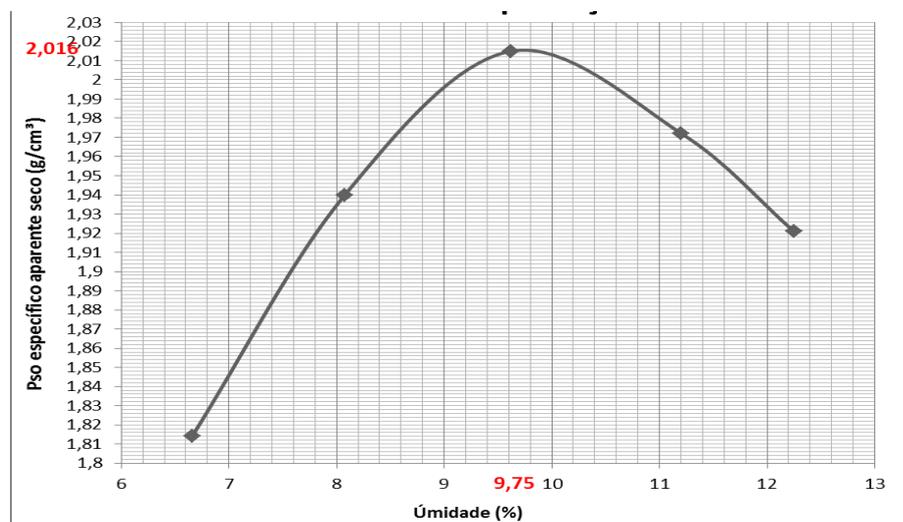
4.3.3 Resultados

FURO 1**Tabela 4 - Dados do Ensaio de Compactação do Furo 1**

| ENSAIO DE COMPACTAÇÃO | | | | | |
|---|------------------------------|--|--------|--------|--------------|
| Proctor | Normal 26 golp. 3 cam. | Umidade Ótima | | | 9,75 |
| Peso da Amostra (g) | 3000 | Densidade Máxima (g/cm ³) | | | 2,016 |
| Dados da Compactação | | | | | |
| Volume do Molde (cm ³) | 940,97 | 940,97 | 940,97 | 940,97 | 940,97 |
| Peso do Molde (g) | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 |
| Peso do Molde + Solo (g) | 3786,8 | 3938,9 | 4044,8 | 4029,8 | 3994,9 |
| Nº da Cápsula | 8 | 47 | 236 | 36 | 34 |
| Peso da Cápsula (g) | 16,80 | 18,00 | 15,90 | 17,40 | 18,60 |
| Peso da Cápsula + Solo Úmido (g) | 80,90 | 80,90 | 76,30 | 82,90 | 85,50 |
| Peso da Cápsula + Solo Seco (g) | 76,90 | 76,20 | 71,00 | 76,30 | 78,20 |
| Umidade (%) | 6,656 | 8,076 | 9,619 | 11,205 | 12,248 |
| Peso Especifico Aparente (g/cm ³) | 1,935 | 2,097 | 2,209 | 2,193 | 2,156 |
| Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm ³) | 1,814 | 1,94 | 2,015 | 1,972 | 1,921 |

Fonte: Autora (2016)

Com os dados obtidos, desenha-se a curva de compactação que consiste na representação da densidade seca em função da umidade conforme figura a seguir.

Figura 26 - Curva de Compactação do Furo 1 Feito no Estacionamento

Fonte: Autora (2016).

FURO 2

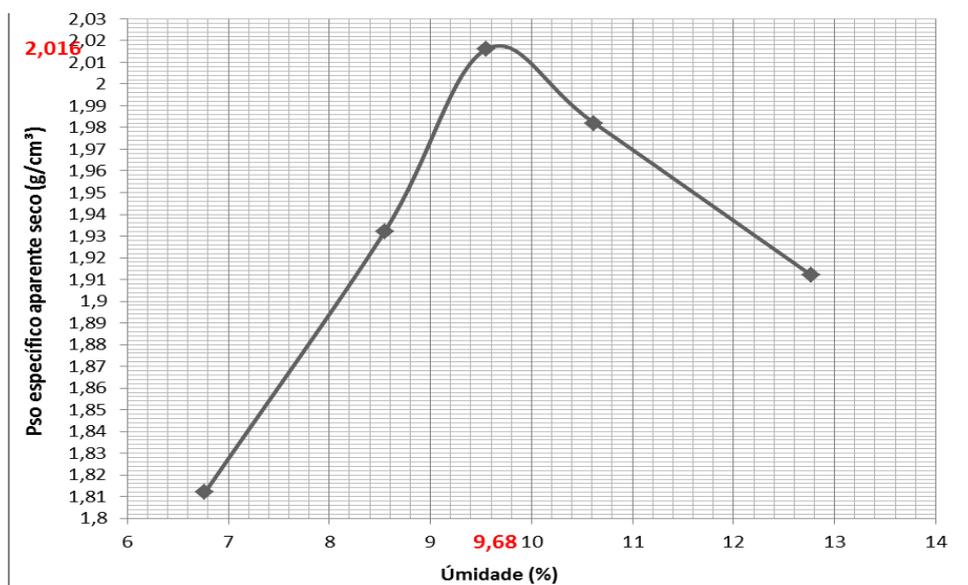
Tabela 5 - Dados do Ensaio de Compactação do Furo 2

| ENSAIO DE COMPACTAÇÃO | | | | | | |
|--|----------------------------|--|--------|--------|--------------|--|
| Proctor | Normal. 26 golp. 3 cam. | Umidade Ótima | | | 9,68 | |
| Peso da Amostra (g) | 3000 | Densidade Máxima (g/cm ³) | | | 2,016 | |
| Dados da Compactação | | | | | | |
| Volume do Molde (cm ³) | 940,97 | 940,97 | 940,97 | 940,97 | 940,97 | |
| Peso do Molde (g) | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | |
| Peso do Molde + Solo (g) | 3786,8 | 3938,9 | 4044,8 | 4029,8 | 3994,9 | |
| Nº da Cápsula | 7 | 8 | 34 | 36 | 47 | |
| Peso da Cápsula (g) | 18,60 | 16,80 | 18,60 | 17,50 | 18,00 | |
| Peso da Cápsula + Solo Úmido (g) | 81,70 | 63,80 | 55,30 | 60,20 | 96,60 | |
| Peso da Cápsula + Solo Seco (g) | 77,70 | 60,10 | 52,10 | 56,10 | 87,70 | |
| Umidade (%) | 6,768 | 8,545 | 9,552 | 10,622 | 12,769 | |
| Peso Específico Aparente (g/cm ³) | 1,935 | 2,097 | 2,209 | 2,193 | 2,156 | |
| Peso Específico Aparente Sec. (g/cm ³) | 1,812 | 1,932 | 2,016 | 1,982 | 1,912 | |

Fonte: Autora (2016)

Com os dados obtidos, desenha-se a curva de compactação que consiste na representação da densidade seca em função da umidade conforme figura a seguir.

Figura 27 - Curva de Compactação do Furo 2 Feito no Estacionamento



Fonte: Autora (2016).

FURO 3

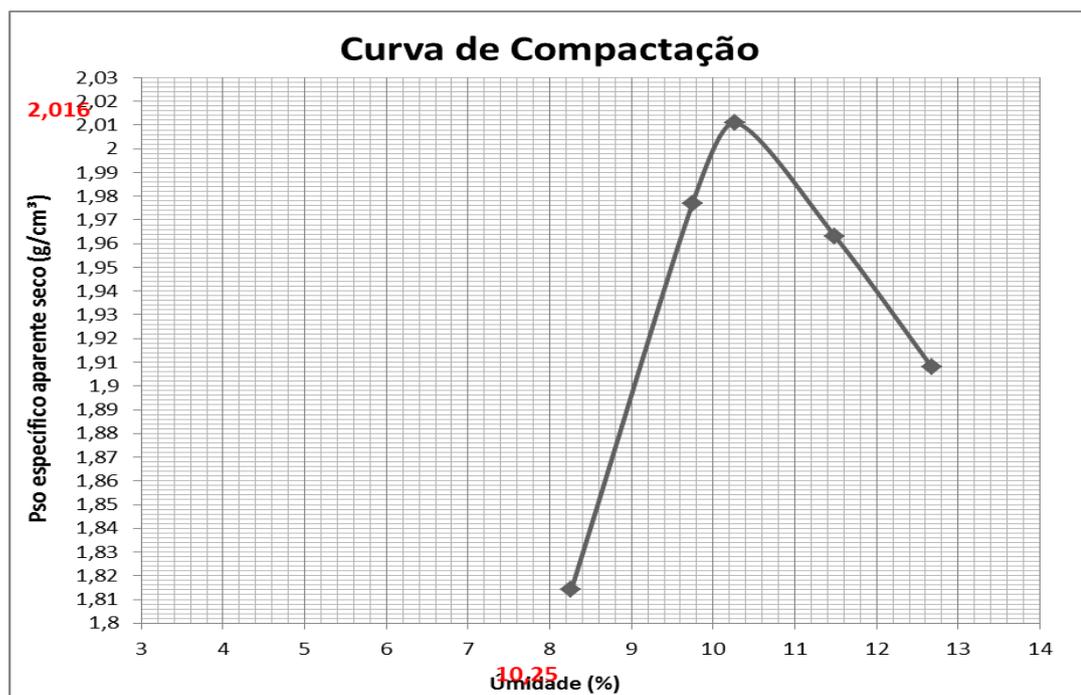
Tabela 6 - Dados do Ensaio de Compactação do 3º Furo

| ENSAIO DE COMPACTAÇÃO | | | | | |
|---|---------------------------|--|--------|--------|--------|
| Proctor | Normal 26 golp. 3 cam. | Umidade Ótima | 10,25 | | |
| Peso da Amostra (g) | 3000 | Densidade Máxima (g/cm ³) | 2,016 | | |
| Dados da Compactação | | | | | |
| Volume do Molde (cm ³) | 940,97 | 940,97 | 940,97 | 940,97 | 940,97 |
| Peso do Molde (g) | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 |
| Peso do Molde + Solo (g) | 3813,6 | 4007,3 | 4053,3 | 4025,2 | 3989,2 |
| Nº da Cápsula | 236 | 235 | 34 | 233 | 33 |
| Peso da Cápsula (g) | 15,90 | 15,40 | 18,60 | 13,90 | 17,10 |
| Peso da Cápsula + Solo Úmido (g) | 67,00 | 76,20 | 83,00 | 33,30 | 81,10 |
| Peso da Cápsula + Solo Seco (g) | 63,10 | 70,80 | 77,00 | 31,30 | 73,90 |
| Umidade (%) | 8,263 | 9,747 | 10,274 | 11,494 | 12,676 |
| Peso Específico Aparente (g/cm ³) | 1,964 | 2,17 | 2,218 | 2,189 | 2,15 |

Fonte: Autora (2016).

Com os dados obtidos, desenha-se a curva de compactação que consiste na representação da densidade seca em função da umidade conforme figura a seguir.

Figura 28 - Curva de Compactação do Furo 3 Feito no Estacionamento



Fonte: Autora (2016).

FURO 4

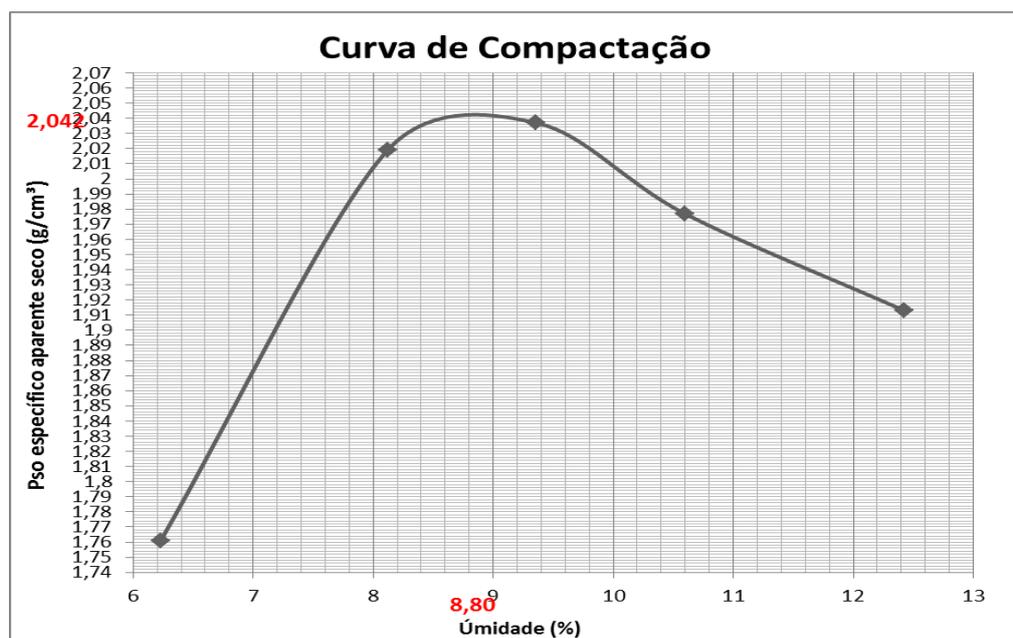
Tabela 7 - Dados do Ensaio de Compactação do Furo 4

| ENSAIO DE COMPACTAÇÃO | | | | | |
|---|---------------------------|--|--------------|--------|--------|
| Proctor | Normal 26 golp. 3 cam. | Umidade Ótima | 8.80 | | |
| Peso da Amostra (g) | 3000 | Densidade Máxima (g/cm ³) | 2,042 | | |
| Dados da Compactação | | | | | |
| Volume do Molde (cm ³) | 940,97 | 940,97 | 940,97 | 940,97 | 940,97 |
| Peso do Molde (g) | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 | 1965,8 |
| Peso do Molde + Solo (g) | 3726,8 | 4019,8 | 4062,2 | 4022,7 | 3990 |
| Nº da Cápsula | 23 | 59 | 9 | 39 | Y |
| Peso da Cápsula (g) | 12,90 | 15,60 | 18,20 | 17,70 | 14,00 |
| Peso da Cápsula + Solo Úmido (g) | 74,30 | 66,20 | 74,30 | 51,10 | 90,00 |
| Peso da Cápsula + Solo Seco (g) | 70,70 | 62,40 | 69,50 | 47,90 | 81,60 |
| Umidade (%) | 6,228 | 8,12 | 9,357 | 10,596 | 12,426 |
| Peso Especifico Aparente (g/cm ³) | 1,871 | 2,183 | 2,228 | 2,186 | 2,151 |
| Peso Especifico Aparente Sec. (g/cm ³) | 1,761 | 2,019 | 2,037 | 1,977 | 1,913 |

Fonte: Autora (2016)

Com os dados obtidos, desenha-se a curva de compactação que consiste na representação da densidade seca em função da umidade conforme figura a seguir.

Figura 29 - Curva de Compactação do Furo 4 Feito no Estacionamento



Fonte: Autora (2016).

4.4 Ensaio CBR ou ISC (Índice De Suporte Califórnia)

O ensaio CBR é regido pela norma ABNT NBR 9895, e nos possibilita saber a expansão de um solo sob um pavimento saturado, e nos fornece indicações da perda de resistência do solo com a saturação. Apesar de ter um caráter empírico, o ensaio de CBR é mundialmente difundido e serve de base para dimensionamento de pavimentações flexíveis. O material necessário para a realização do ensaio de CBR é proveniente do ensaio de compactação.

4.4.1 Procedimento Experimental

O ensaio é composto por três etapas: Compactação do corpo de prova; Obtenção da curva de expansão; Medida da resistência à penetração..

O procedimento experimental é semelhante ao ensaio de compactação, porém aqui são compactadas cinco camadas com a quantidade de água que corresponde a umidade ótima do material ensaiado.

Primeiramente, retira-se a umidade do material um dia antes da realização do ensaio a fim de obter-se a quantidade de água que será adicionada ao material no momento do ensaio CBR. Reservamos 7kg de amostra (devidamente peneirada na #10) por corpo de prova, serão um total de quatro corpos de prova. Fez-se no estudo, um corpo de prova para cada furo por motivos de insuficiência de material, porém por norma o mais adequado seria quatro corpos de prova por furo.

Após a retirada do material e preparação, adiciona-se a quantidade de água para obter-se a umidade ótima e em seguida coloca-se no cilindro para ser compactado em cinco camadas com o soquete grande, utilizando 26 golpes por camada segundo norma.

Após compactação, pesa-se o cilindro com o material úmido, e com a rebarba do material retira-se a sua umidade.

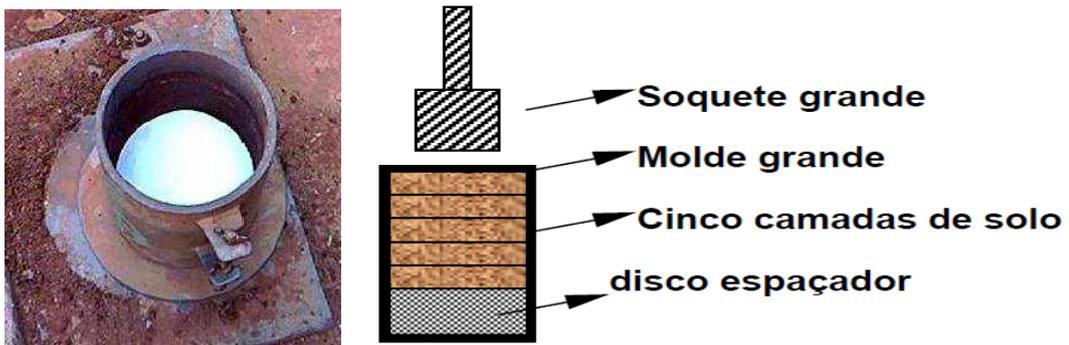
O cilindro é então colocado em um reservatório com água e monitorada a sua expansão através do extensômetro por quatro dias. No quarto dia, retira-se o cilindro da água,

deixa-se escorrer por cerca de 10 minutos e em seguida coloca-se no aparelho Marshall para obtenção da sua força de acordo com a penetração.

A seguir tem-se nas Figuras 30 a 34 algumas imagens dos procedimentos descritos:

- Compactação do Corpo de Prova:

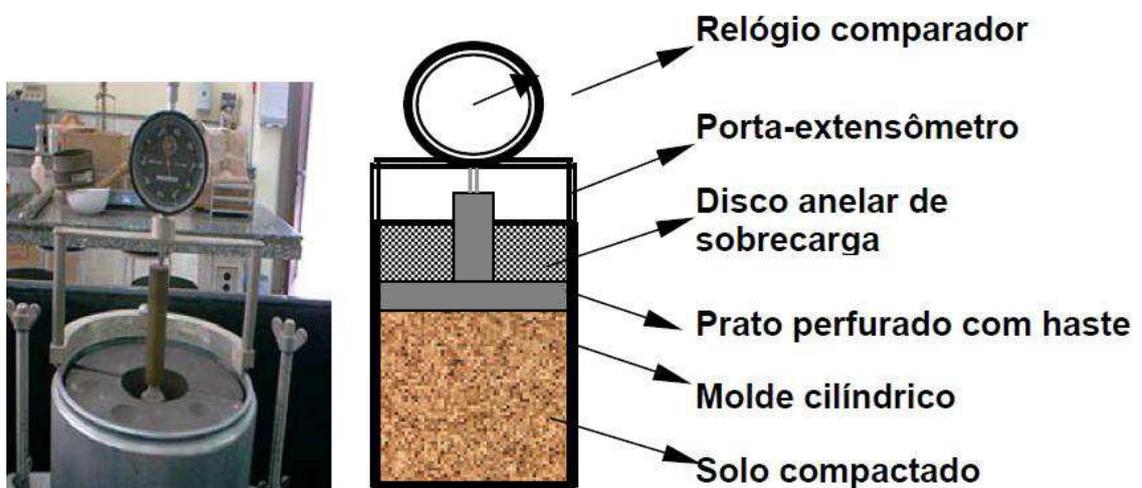
Figura 30 - Colocação do Papel Filtro e Esquema de Compactação



Fonte: Fortes (2015).

- Obtenção da curva de expansão:

Figura 31 - Montagem e Esquema para Determinação da Expansão



Fonte: Fortes (2015).

- Medida da resistência à penetração:

Figura 32 - Corpos de Prova Imersos em Água por 4 Dias para a Realização do Ensaio CBR



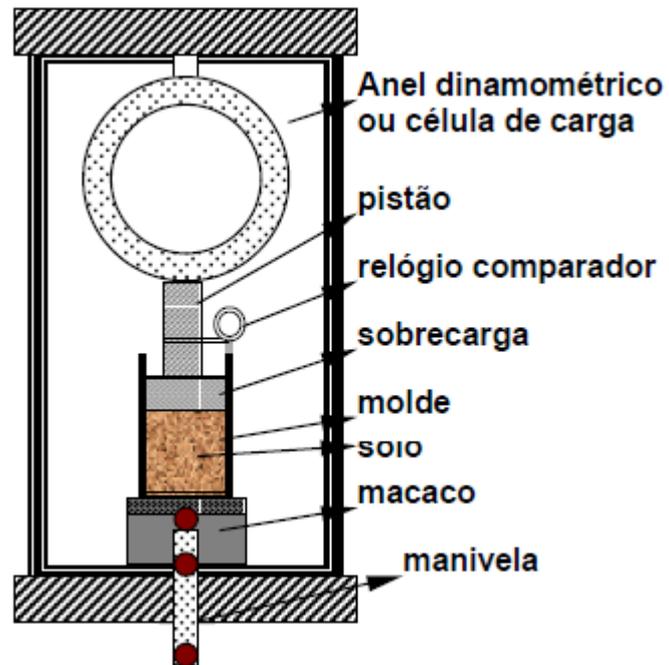
Fonte: Autora (2016)

Figura 33 - Prensa do Ensaio CBR para Obtenção da Resistência à Penetração



Fonte: Autora (2016)

Figura 34 - Esquema da Prensa do Ensaio CBR



Fonte: Fortes (2015)

4.4.2 Resultados

FURO 1

Figura 35 - Resultado dos Ensaio CBR e Expansão no Furo 01

| INDICE SUPORTE CALIFORNIA (CBR) | | | | | | | |
|---|-------------|--------------------|-------------------------------|------------------------|---|-----------------|--|
| PREPARAÇÃO DA AMOSTRA (FURO 1) | | | | | | | |
| DETERMINAÇÕES DE UMIDADE | | HIGROSCÓPICA | | MOLDADGEM | | CÁLCULO DA ÁGUA | |
| Cápsula nº | 41 | 31 | 2 | 39 | PESO DO SOLO PASSANDO NA PENEIRA Nº 4 | | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 22 | 27,2 | 85 | 73,9 | ÚMIDO | 7000 | |
| Solo seco+cap (g) | 21,8 | 26,9 | 79,8 | 69,7 | SECO | 6893,83 | |
| Cápsula (g) | 8,3 | 8,2 | 16,4 | 17,7 | ÁGUA (ml): | 566 | |
| Água (g) | 0,2 | 0,3 | 5,2 | 4,2 | PESO PEDREGULHO RETIDO NA PENEIRA 19 mm | | |
| Solo Seco (g) | 13,5 | 18,7 | 63,4 | 52 | | | |
| Teor de Umidade (%) | 1,48 | 1,6 | 8,2 | 8,08 | | | |
| Umidade Média (%) | 1,54 | | 8,14 | | 0 | | |
| UMID. (%): | 9,75 | AMOSTRA ÚMIDA (g): | 7000 | ÁGUA A ADICIONAR (ml): | 566 | | |
| COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA | | | EXPANSÃO | | | | |
| Cilindro nº | 15 | | Altura do Corpo de Prova (mm) | | 115,09 | | |
| Água Adicionada (ml) | 566 | | DATA | TEMPO DIAS | Expansão (mm) | Expansão (%) | |
| Peso Cilindro + Solo Úmido (g) | 9552,8 | | | | | | |
| Peso Cilindro (g) | 4868,2 | | 15/06 | 0 | 0 | 0 | |
| Peso Solo Úmido (g) | 4684,6 | | 16/07 | 1 | 0 | 0 | |
| Volume Cilindro (cm ³) | 1673,19 | | 17/08 | 2 | 0,1 | 0,09 | |
| Densid. Aparente Úmida (g/cm ³) | 2,8 | | 18/09 | 3 | | | |
| Densid. Aparente Seca (g/cm ³) | 2,589 | | 19/10 | 4 | 0,1 | 0,09 | |
| Constante do anel | | 0,05093 | | | | | |
| Tempo (min) | Penet. (mm) | Leitura (0,001) | Pressão (kg/cm ²) | | | | |
| | 0 | 0 | 0 | | | | |
| | 0,63 | 225 | 11,46 | | | | |
| | 1,27 | 268 | 13,65 | | | | |
| | 1,9 | 303 | 15,43 | | | | |
| | 2,54 | 335 | 17,06 | | | | |
| | 3,17 | 367 | 18,69 | | | | |
| | 3,81 | 394 | 20,07 | | | | |
| | 4,44 | 423 | 21,54 | | | | |
| | 5,08 | 454 | 23,12 | | | | |
| | 6,35 | 510 | 25,97 | | | | |
| | 7,62 | 560 | 28,52 | | | | |
| | 8,89 | 612 | 31,17 | | | | |
| | 10,16 | 664 | 33,82 | | | | |
| | 11,43 | 713 | 36,31 | | | | |
| | 12,7 | 765 | 38,96 | | | | |
| CÁLCULO DO I.S.C. | | | | | | | |
| Penet. (mm) | Pressão | | I.S.C. | | | | |
| | Aplic. | Corrigida | (%) | | | | |
| 2,54 | 17,06 | | 24,26 | | | | |
| 5,08 | 23,12 | | 21,99 | | | | |
| I.S.C.(%): | | 24,26 | | | | | |
| EXPANSÃO(%): | | 0,09 | | | | | |

CBR

Pressão (kg/cm²)

Penetração (0,01mm)

Fonte: Autora (2016)

FURO 2

Figura 36 - Resultado dos Ensaio CBR e Expansão no Segundo Furo

| INDICE SUPORTE CALIFORNIA (CBR) | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|--------------------|-------------------------------|------------------------|--|-----------------|---|
| PREPARAÇÃO DA AMOSTRA (FURO 2) | | | | | | | |
| DETERMINAÇÕES DE UMIDADE | | HIGROSCÓPICA | | MOLDADGEM | | CÁLCULO DA ÁGUA | |
| Cápsula nº | 10 | 40 | 8 | 9 | PESO DO SOLO PASSANDO NA PENEIRA Nº 4 | | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 26,7 | 27,7 | 70,3 | 77,5 | | | |
| Solo seco+cap (g) | 26,4 | 27,4 | 66,6 | 73,2 | ÚMIDO | 7000 | |
| Cápsula (g) | 8,8 | 8,9 | 16,8 | 18,1 | SECO | 6885,7 | |
| Água (g) | 0,3 | 0,3 | 3,7 | 4,3 | ÁGUA (ml): | 552 | |
| Solo Seco (g) | 17,6 | 18,5 | 49,8 | 55,1 | PESO DO PEDREGULHO RETIDO NA PENEIRA 19 mm | | |
| Teor de Umidade (%) | 1,7 | 1,62 | 7,43 | 7,8 | | | |
| Umidade Média (%) | 1,66 | | 7,615 | | | | 0 |
| | | | | ÁGUA (ml): | | 0 | |
| UMID. (%): | 9,68 | AMOSTRA ÚMIDA (g): | 7000 | ÁGUA A ADICIONAR (ml): | | 552 | |
| COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA | | | | EXPANSÃO | | | |
| Cilindro nº | 13 | | Altura do Corpo de Prova (mm) | | | 114,59 | |
| Água Adicionada (ml) | 552 | | DATA | TEMPO DIAS | Expansão (mm) | Expansão (%) | |
| Peso do Cilindro + Solo Úmido (g) | 8306,3 | | | | | | |
| Peso do Cilindro (g) | 4300,3 | | 15/06/2016 | 0 | 0 | 0 | |
| Peso do Solo Úmido (g) | 4006 | | 16/06/2016 | 1 | 0,3 | 0,26 | |
| Volume do Cilindro (cm³) | 1578,81 | | 17/06/2016 | 2 | 0,3 | 0,26 | |
| Densid. Aparente Úmida (g/cm³) | 2,537 | | 18/06/2016 | 3 | | 0 | |
| Densid. Aparente Seca (g/cm³) | 2,357 | | 19/06/2016 | 4 | 0,4 | 0,35 | |
| Constante do anel | | 0,0509296 | | | | | |
| Tempo (min) | Penet. (mm) | Leitura (0,001) | Pressão (kg/cm²) | | | | |
| | 0 | 0 | 0 | | | | |
| | 0,63 | 71 | 3,62 | | | | |
| | 1,27 | 70 | 3,57 | | | | |
| | 1,9 | 74 | 3,77 | | | | |
| | 2,54 | 78 | 3,97 | | | | |
| | 3,17 | 81 | 4,13 | | | | |
| | 3,81 | 85 | 4,33 | | | | |
| | 4,44 | 88 | 4,48 | | | | |
| | 5,08 | 91 | 4,63 | | | | |
| | 6,35 | 98 | 4,99 | | | | |
| | 7,62 | 105 | 5,35 | | | | |
| | 8,89 | 112 | 5,7 | | | | |
| | 10,16 | 117 | 5,96 | | | | |
| | 11,43 | 124 | 6,32 | | | | |
| | 12,7 | 131 | 6,67 | | | | |
| CÁLCULO DO I.S.C. | | | | | | | |
| Penet. (mm) | Pressão | | I.S.C. | | | | |
| | Aplic. | Corrigida | (%) | | | | |
| 2,54 | 3,97 | | 5,65 | | | | |
| 5,08 | 4,63 | | 4,4 | | | | |
| I.S.C.(%): | | 5,65 | | | | | |
| EXPANSÃO(%): | | 0,35 | | | | | |

CBR

Pressão (kg/cm²)

Penetração (0,01mm)

Fonte: Autora (2016)

FURO 3

Figura 37 - Resultado dos Ensaio CBR e Expansão no Furo 3

| INDICE SUPORTE CALIFORNIA (CBR) | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------|--------------------|-------------------------------|------------------------|---|-----------------|--|
| PREPARAÇÃO DA AMOSTRA (FURO 3) | | | | | | | |
| DETERMINAÇÕES DE UMIDADE | | HIGROSCÓPICA | | MOLDAGEM | | CÁLCULO DA ÁGUA | |
| Cápsula nº | 30 | 16 | 9 | 23 | PESO DO SOLO PASSANDO NA PENEIRA Nº 4 | | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 23 | 22,9 | 68,5 | 55,1 | ÚMIDO | 7000 | |
| Solo seco+cap (g) | 22,7 | 22,7 | 64,6 | 51,7 | SECO | 6905,06 | |
| Cápsula (g) | 4,5 | 4,5 | 19,5 | 13 | ÁGUA (ml): | 613 | |
| Água (g) | 0,3 | 0,2 | 3,9 | 3,4 | PESO PEDREGULHO RETIDO NA PENEIRA 19 mm | | |
| Solo Seco (g) | 18,2 | 18,2 | 45,1 | 38,7 | 0 | | |
| Teor de Umidade (%) | 1,65 | 1,1 | 8,65 | 8,79 | ÁGUA (ml): | | |
| Umidade Média (%) | 1,375 | | 8,72 | | 0 | | |
| UMID. (%): | 10,25 | AMOSTRA ÚMIDA (g): | 7000 | ÁGUA A ADICIONAR (ml): | 613 | | |
| COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA | | | EXPANSÃO | | | | |
| Cilindro nº | 14 | | Altura do Corpo de Prova (mm) | | 118 | | |
| Água Adicionada (ml) | 613 | | DATA | TEMPO DIAS | Expansão (mm) | Expansão (%) | |
| Peso Cilindro + Solo Úmido (g) | 8700,7 | | 15/06/2016 | 0 | 0 | 0 | |
| Peso Cilindro (g) | 4238,3 | | 16/06/2016 | 1 | 0 | 0 | |
| Peso Solo Úmido (g) | 4462,4 | | 17/06/2016 | 2 | 0 | 0 | |
| Volume Cilindro (cm³) | 1673,19 | | 18/06/2016 | 3 | | | |
| Densid. Aparente Úmida (g/cm³) | 2,667 | | 19/06/2016 | 4 | 0,1 | 0,08 | |
| Densid. Aparente Seca (g/cm³) | 2,453 | | | | | | |
| Constante do anel | | 0,0509296 | | | | | |
| Tempo (min) | Penet. (mm) | Leitura (0,001) | Pressão (kg/cm²) | | | | |
| | 0 | 0 | 0 | | | | |
| | 0,63 | 24 | 1,22 | | | | |
| | 1,27 | 42 | 2,14 | | | | |
| | 1,9 | 61 | 3,11 | | | | |
| | 2,54 | 82 | 4,18 | | | | |
| | 3,17 | 106 | 5,4 | | | | |
| | 3,81 | 129 | 6,57 | | | | |
| | 4,44 | 150 | 7,64 | | | | |
| | 5,08 | 173 | 8,81 | | | | |
| | 6,35 | 220 | 11,2 | | | | |
| | 7,62 | 263 | 13,39 | | | | |
| | 8,89 | 307 | 15,64 | | | | |
| | 10,16 | 350 | 17,83 | | | | |
| | 11,43 | 389 | 19,81 | | | | |
| | 12,7 | 427 | 21,75 | | | | |
| CÁLCULO DO I.S.C. | | | | | | | |
| Penet. (mm) | Pressão | | I.S.C. | | | | |
| | Aplic. | Corrigida | (%) | | | | |
| 2,54 | 4,18 | | 5,95 | | | | |
| 5,08 | 8,81 | | 8,38 | | | | |
| I.S.C.(%): | | 8,38 | | | | | |
| EXPANSÃO(%): | | 0,08 | | | | | |

CBR

Y-axis: Pressão (kg/cm²)

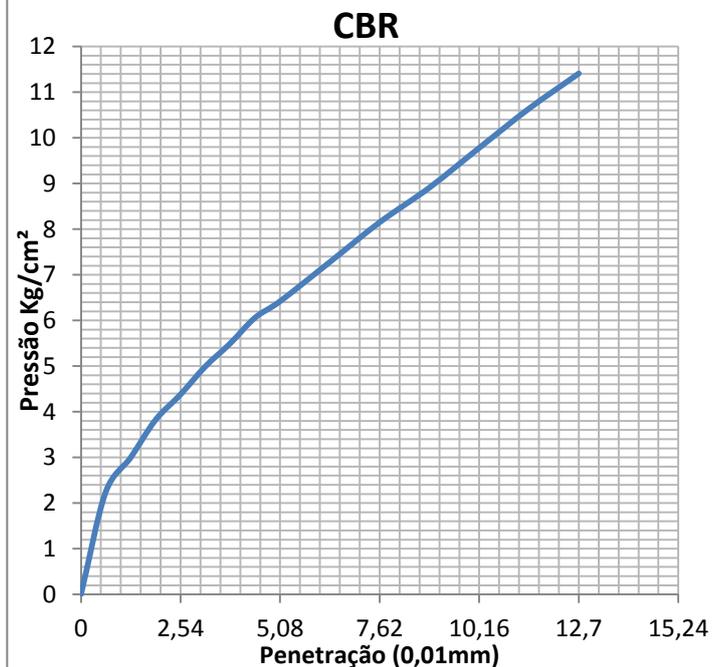
X-axis: Penetração (0,01mm)

Fonte: Autora (2016)

FURO 4

Figura 38 - Resultado dos Ensaio CBR e Expansão no Furo 4

| INDICE SUPORTE CALIFORNIA (CBR) | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------|-----------------|--------------------|-------------------------------|---|------------------------|--------------|-----|
| PREPARAÇÃO DA AMOSTRA (FURO 4) | | | | | | | | |
| DETERMINAÇÕES DE UMIDADE | | HIGROSCÓPICA | | MOLDADGEM | | CÁLCULO DA ÁGUA | | |
| Cápsula nº | 6 | 24 | 7 | 47 | PESO DO SOLO PASSANDO NA PENEIRA Nº 4 | | | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 22,4 | 18,8 | 67,4 | 65 | ÚMIDO | | 7000 | |
| Solo seco+cap (g) | 22,2 | 18,7 | 64 | 62 | SECO | | 6937,91 | |
| Cápsula (g) | 4 | 4,3 | 18,6 | 18 | ÁGUA (ml): | | 548 | |
| Água (g) | 0,2 | 0,1 | 3,4 | 3 | PESO PEDREGULHO RETIDO NA PENEIRA 19 mm | | | |
| Solo Seco (g) | 18,2 | 14,4 | 45,4 | 44 | ÁGUA (ml): | | 0 | |
| Teor de Umidade (%) | 1,1 | 0,69 | 7,49 | 6,82 | ÁGUA A ADICIONAR (ml): | | 548 | |
| Umidade Média (%) | 0,895 | | 7,155 | | | | | |
| UMID. (%): | | 8,8 | AMOSTRA ÚMIDA (g): | | 7000 | ÁGUA A ADICIONAR (ml): | | 548 |
| COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA | | | | EXPANSÃO | | | | |
| Cilindro nº | 21 | | | Altura do Corpo de Prova (mm) | | | 114,81 | |
| Água Adicionada (ml) | 548 | | | DATA | TEMPO DIAS | Expansão (mm) | Expansão (%) | |
| Peso Cilindro + Solo Úmido (g) | 8538,7 | | | | | | | |
| Peso Cilindro (g) | 4328,8 | | | 15/06/2016 | 0 | 0 | 0 | |
| Peso Solo Úmido (g) | 4209,9 | | | 16/06/2016 | 1 | 0 | 0 | |
| Volume Cilindro (cm³) | 1601,1 | | | 17/06/2016 | 2 | 0 | 0 | |
| Densid. Aparente Úmida (g/cm³) | 2,629 | | | 18/06/2016 | 3 | | | |
| Densid. Aparente Seca (g/cm³) | 2,453 | | | 19/06/2016 | 4 | 0,1 | 0,09 | |
| Constante do anel | | 0,05093 | | | | | | |
| Tempo (min) | Penet. (mm) | Leitura (0,001) | Pressão (kg/cm²) | | | | | |
| | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| | 0,63 | 44 | 2,24 | | | | | |
| | 1,27 | 59 | 3 | | | | | |
| | 1,9 | 75 | 3,82 | | | | | |
| | 2,54 | 86 | 4,38 | | | | | |
| | 3,17 | 98 | 4,99 | | | | | |
| | 3,81 | 108 | 5,5 | | | | | |
| | 4,44 | 119 | 6,06 | | | | | |
| | 5,08 | 126 | 6,42 | | | | | |
| | 6,35 | 143 | 7,28 | | | | | |
| | 7,62 | 160 | 8,15 | | | | | |
| | 8,89 | 175 | 8,91 | | | | | |
| | 10,16 | 192 | 9,78 | | | | | |
| | 11,43 | 209 | 10,64 | | | | | |
| | 12,7 | 224 | 11,41 | | | | | |
| CÁLCULO DO I.S.C. | | | | | | | | |
| Penet. (mm) | Pressão | | I.S.C. | | | | | |
| | Aplic. | Corrigida | (%) | | | | | |
| 2,54 | 4,38 | | 6,23 | | | | | |
| 5,08 | 6,42 | | 6,1 | | | | | |
| I.S.C.(%): | | | 6,23 | | | | | |
| EXPANSÃO(%): | | | 0,09 | | | | | |



Fonte: Autora (2016)

Observa-se que em todos os ensaios o valor do CBR $> 2\%$ e Expansão $\leq 2\%$. Essas são as condições segundo Marchioni (2011) para que o subleito possa receber o pavimento permeável do tipo Intertravado.

5. ROTEIRO DE UM PROJETO DE PAVIMENTO INTERTRAVADO PERMEÁVEL

5.1 Seção Tipo

Conforme exposto no item 3, o pavimento intertravado permeável é formado por: revestimento, camada de assentamento, base e sub-base, tubulação de drenagem (se necessário), e subleito (Figura 4).

A camada de assentamento segundo Marchioni (2011), deve ter espessura de 50mm. Sua função é assentar uniformemente as peças de concreto pré-moldado.

Já as camadas de base e sub-base são dimensionadas para cada caso, bem como a necessidade ou não de tubulação.

5.2 Informações do Empreendimento

Segundo Marchioni (2011), para garantir que a instalação do pavimento permeável seja executável, devemos verificar alguns itens. São eles:

- As áreas de contribuição não podem ser cinco vezes maior que a área do pavimento;
- Recomenda-se um mínimo de 30m de distância entre córregos, reservatórios de água e pântanos;
- Declividade máxima do pavimento: 5%. Caso ultrapasse esse valor, a velocidade do escoamento superficial aumentará fazendo com que diminua a infiltração da água no pavimento;
- Declividades superiores a 20% devem ser evitadas no entorno do pavimento;
- A precipitação do local deve ser conhecida, bem como definidos o período de retorno do projeto (de 5 a 10 anos para projetos de micro drenagem, caso dos pavimentos permeáveis). Com isso, será definida a precipitação que será utilizada para dimensionar o pavimento permeável;
- Devem ser conhecidos também, os dados de tráfego no local a ser implantado o pavimento. Esse dado é expresso, segundo Marchioni (2011), em solicitações equivalentes ao eixo padrão de 18000kip (80KN) sendo adotado uma vida útil do pavimento de 20 anos;

-Necessita-se, por fim, os dados do subleito para o dimensionamento. Bem como o tipo de solo, coeficiente de permeabilidade e capacidade de suporte (CBR ou ISC) para o dimensionamento da base do pavimento permeável.

Tabela 8 – Valores Típicos de Coeficiente de Permeabilidade

| | |
|------------------|---------------------------|
| Argilas | $< 10^{-9}$ m/s |
| Siltes | 10^{-6} a 10^{-9} m/s |
| Areias argilosas | 10^{-7} m/s |
| Areias finas | 10^{-5} m/s |
| Areias médias | 10^{-4} m/s |
| Areias grossas | 10^{-3} m/s |

Fonte: Marchioni (2011)

Pela tabela, percebe-se que quanto menor for o coeficiente de permeabilidade, menos permeável será o solo. Por isso, em solos pouco permeáveis utilizam-se tubos de drenagem para evitar o acúmulo de água por muito tempo na estrutura do pavimento, o que pode ocasionar perda de suporte do mesmo.

5.3 Materiais para Base e Sub-base

Como já exposto, essas camadas são constituídas de material granular, as chamadas britas ou agregados graúdos. Elas serão o reservatório do pavimento permeável, e serão dimensionadas mais pra frente.

É significativo destacar algumas características que esse material deve ter para que cumpra a sua função de armazenar água.

Marchioni (2011) salienta que, tanto para a base e sub-base, utilizamos brita lavada com Abrasão Los Angeles menor que 40.

Ela afirma ainda que, a capacidade de atuação da base-reservatório vai depender dos vazios criados pelos agregados, para isso, massa unitária e o volume de vazios devem ser de no mínimo 32% como mostra a norma NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

Tabela 9 – Granulometria para Camadas de Sub-Base e Base de Um Pavimento Permeável.

| Peneira com abertura de malha | Sub-base (% retida) | Base (% retida) |
|-------------------------------|---------------------|-----------------|
| 75 mm | 0 | |
| 63 mm | 0 a 10 | |
| 50 mm | 30 a 65 | |
| 37 mm | 85 a 100 | 0 |
| 25 mm | | 0 a 5 |
| 19 mm | 95 a 100 | |
| 12,5 mm | | 40 a 75 |
| 4,75 mm | | 90 a 100 |
| 2,36 mm | | 95 a 100 |

Fonte: Marchioni (2011)

É significativo salientar que desde que atendam o critério de índice de vazios mínimos de 32% e ISC de 80%, que garantirá a capacidade de armazenamento de água na base/sub-base, podem ser utilizadas outras granulometrias.

5.4 Materiais para Camada de Assentamento e Rejunte

O assentamento do pavimento Intertravado permeável é feito utilizando agregado graúdo com dimensão máxima de 9,5mm. O agregado da camada de assentamento deve ter dimensão suficiente para garantir uma uniformidade para o assentamento das peças pre-moldadas de concreto, ao mesmo tempo deve garantir o travamento com a camada de base. (MARCHIONI, 2011).

Para que isso ocorra deve ser obedecida a seguinte relação:

$$D15(\text{base})/D15(\text{assentamento}) < 5 \text{ e } D50(\text{base})/D50(\text{assentamento}) > 2$$

Onde:

D_x = dimensão onde $x\%$ dos agregados é mais fino

Para o material do rejunte das peças pode-se utilizar o mesmo agregado da camada de assentamento, ou agregados mais finos para garantir o preenchimento das juntas como vemos na tabela a seguir. Porém, destacamos que como afirma Marchioni (2011), não é recomendado que se utilize areia ou pó de pedra na camada de assentamento e no rejunte pois esses materiais possuem baixo coeficiente de permeabilidade. E o que almejamos é um pavimento permeável e não o contrário.

Tabela 10 – Granulometria Recomendada para Camadas de Assentamento e Material de Rejunte para Pavimento Permeável

| Peneira com abertura de malha | Camada de assentamento e material de rejunte (% retida) | Material de rejunte (% retida) | |
|-------------------------------|---|--------------------------------|----------|
| 12,5 mm | 0 | 0 | |
| 9,5 mm | 0 a 15 | 0 a 10 | 0 |
| 4,75 mm | 70 a 90 | 45 a 80 | 0 a 15 |
| 2,36 mm | 90 a 100 | 70 a 95 | 60 a 90 |
| 1,16 mm | 95 a 100 | 90 a 100 | 90 a 100 |
| 0,300 mm | | 95 a 100 | 95 a 100 |

Fonte: Marchioni (2011)

5.5 Revestimento

As peças pré-moldadas utilizadas no pavimento Intertravado permeável apropriadas para tráfego de veículos são as que possuem relação comprimento/espessura menor que 4 (MARCHIONI, 2011)

Se essa peça for porosa, recomenda-se segundo a norma NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação, além do ensaio de resistência à compressão, verificar o coeficiente de permeabilidade do concreto através do uso de um permeâmetro de carga variável que permite o ensaio com o corpo de prova totalmente saturado.

5.6 Pré-dimensionamento das Camadas de Base e Sub-base

Serão necessários os dimensionamentos hidráulico e mecânico para os pavimentos permeáveis. O primeiro trata do volume de água que o pavimento armazenará, e o segundo da carga que ele suportará ou que ele será submetido.

Para o pré-dimensionamento hidráulico, deve-se conhecer os dados de **precipitação** da região e o **coeficiente de permeabilidade** do solo, e também ser avaliado o **risco de contaminação da água**.

A partir de então, escolhe-se o tipo de infiltração do sistema que deverá ser de infiltração total, parcial ou sem infiltração. (Ver item 3).

Na infiltração total, a água será direcionada em sua totalidade para o subleito. Já na infiltração parcial, será necessária a drenagem do excesso de água através de tubos para essa finalidade. Quando o solo possui uma baixa permeabilidade, ou ocorrer o risco de contaminação da água, utiliza-se o sistema sem infiltração em que toda a água é direcionada a um sistema de drenagem. (MARCHIONI, 2011)

Marchioni (2011) afirma ainda que para dimensionamento de Pavimento Intertravado, tem-se um método proposto pelo ICPI – Interlocking Concrete Pavement Association. Nele, determina-se a profundidade mínima da camada de base que será necessária para armazenar a diferença entre o volume de água precipitada e infiltrada pelo solo. Utiliza-se para essa finalidade a equação abaixo:

$$Hb = (PR + P - fT)/Vr$$

Onde:

hb = altura da base granular

R = quociente da área de contribuição e da área do pavimento

P = altura da chuva de projeto

f = coeficiente de permeabilidade do solo

T = tempo de enchimento do reservatório

Vr = porosidade do agregado

De acordo com o manual citado, recomenda-se utilizar como chuva de projeto altura máxima de precipitação em 24h para o tempo de retorno definido em projeto.

A equação acima considera $T=2h$, ou seja, o tempo que leva para o reservatório ficar saturado na ocorrência da chuva de projeto é de 2h para este parâmetro.

Duas verificações, segundo Marchioni (2011), para a altura da base granular (hb) são necessárias: a altura máxima da base permitida ($hmax$) e o nível do lençol freático.

Para a verificação do $hmax$, utilizaremos a equação a seguir:

$$hmax = f^*(Ts/Vr)$$

Onde:

Ts = tempo máximo de armazenamento da água;

Essa segunda verificação é proposta com intuito de evitar que a altura da base granular permita a permanência da água na base por um período maior que 72 horas, que é o tempo máximo de armazenamento da água (Ts). Isso evita que o pavimento perca suporte devido a saturação do solo.

Feito isso, deve ser considerado o caso mais crítico entre as duas verificações, e adotá-lo como espessura da base. Caso o valor de $hmax$ seja inferior ao hb torna-se necessário complementar o sistema com tubulação de drenagem para o manejo do excesso de água, utilizando assim um sistema de infiltração parcial ou sem infiltração.

O pré-dimensionamento mecânico é feito de modo similar ao pavimento Intertravado convencional, como referência tem-se a tabela a seguir para o pré-dimensionamento. Para isso, deve ser conhecida a capacidade de suporte do solo e o número de soluções equivalentes para um projeto de vida útil de 20 anos (Número “N”).

Tabela 11 – Recomendação de Espessura Mínima da Camada de Base

| | Índice de Suporte Califórnia do Subleito | | |
|---|--|---------|-------|
| Solicitações equivalentes para 20 anos* | > 15 | 10 a 14 | 5 a 9 |
| 50,000 | 125 | 175 | 225 |
| 150,000 | 150 | 200 | 275 |
| 600,000 | 175 | 225 | 350 |

Fonte: Marchioni (2011)

Adota-se como espessura das camadas de base e sub-base o maior valor entre os dois dimensionamentos (hidráulico e mecânico). Sendo que, a camada de base tem espessura fixa de 100mm, e a camada de sub-base terá como dimensão a diferença para atingir o valor total dimensionado.

6 ETAPAS DE EXECUÇÃO DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL UTILIZANDO PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO

De acordo com o manual de Melhores Práticas Pavimento Intertravado Permeável proposto pela ABCP (2011), a execução é semelhante ao pavimento Intertravado convencional (blocket), porém utilizando diferentes materiais para as camadas que compõem a estrutura do pavimento.

A seguir apresenta-se os passos para a execução desse tipo de pavimento:

Figura 39 - Etapas para a Execução de um Pavimento Permeável com Peças Pré-Moldadas de Concreto



Fonte: Marchioni (2011)

ETAPA 1: PREPARAÇÃO DO SUBLEITO

O subleito é a camada mais profunda do pavimento, ele poderá ser constituído pelo solo natural do local ou oriundo de empréstimo (mais oneroso) desde que possua índice de suporte Califórnia (CBR) maior que 2% e expansão volumétrica menor ou igual a 2%.

Na execução, o subleito deve estar limpo, sem qualquer tipo de matéria orgânica como plantas, raízes entre outros. É significativo, a verificação das cotas e caimentos definidos em projeto, antes de se iniciar a execução das camadas subsequentes (base e sub-base). Se existir tubulação de drenagem, esta deve ser feita conforme projeto e direcionada para uma caixa de retenção ou para sistema de drenagem (sarjeta, por exemplo).

ETAPA 2: POSICIONAMENTO DA MANTA GEOTEXTIL

A manta geotêxtil tem a função de evitar o carreamento de finos para a camada de sub-base. Ela deve ser utilizada quando especificada em projeto. Além disso, deve ser colocada acima do subleito de modo que se deixe sobras laterais de 30cm em solos com o CBR maior que 5% e de 60cm em solos mais fracos, que possuem CBR menor ou igual a 5%.

ETAPA 3: EXECUÇÃO DAS CAMADAS DE BASE E SUB-BASE

Espalha-se a brita de graduação aberta pela sub-base em camadas de 100mm a 150mm e compacta-se utilizando uma placa vibratória ou rolo compactador. A base possui espessura de 100 mm e é compactada de maneira similar à sub-base.

ETAPA 4: ASSENTAMENTO DAS PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO

Para que o assentamento propriamente dito, seja iniciado, as contenções laterais devem ser posicionadas visando a garantia da estabilidade lateral do sistema. Essas contenções são formadas por uma estrutura rígida ou por dispositivos fixados na base do pavimento como forma de impedir seu deslocamento. O bloco Intertravado deve ser assentado de maneira uniforme com espessura suficiente para que após compactado sua espessura seja de 50mm. Após isso, nivela-se o material manual ou mecanicamente para então instalar as peças de concreto. É significativo destacar que, não deve haver tráfego de equipamentos e/ou pedestres após o nivelamento.

ETAPA 5: REJUNTAMENTO

Após o assentamento das peças, o material de rejunte deve ser espalhado seco sobre o revestimento de modo que forme uma fina camada uniforme por toda área executada. Feito isso, deve-se varrer o material de rejuntamento de modo a preencher as juntas entre as peças e destas com a contenção lateral. Ambas devem ser preenchidas a 5mm do topo das peças.

ETAPA 6: COMPACTAÇÃO

Nessa etapa, teremos a acomodação das peças na camada de assentamento através de placas vibratórias. Para isso, deve seguir os seguintes critérios:

A execução da compactação deve ser feito de modo alternado com o espalhamento do material de rejuntamento até que estas sejam preenchidas a 5mm do topo do pavimento.

7 ESTUDO DE CASO – PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO

Sabendo-se que o subleito do estacionamento do CCT – UEMA, possui CBR maior que 2% e Expansão Volumétrica menor ou igual a 2%, é possível afirmar que ele suporta o recebimento de um pavimento permeável do tipo Intertravado.

Desse modo, sugere-se com base na literatura um dimensionamento para o mesmo. Em outras palavras, será proposta a altura das seções de cada camada do pavimento bem como o tipo de material que a compõe.

A seguir tem-se a proposta de dimensionamento:

É sabido, que para o dimensionamento do pavimento necessitaremos pre-dimensionar as camadas de base e sub-base. Para isso, faz-se necessário dois tipos de dimensionamento, o hidráulico (volume de água que o pavimento deverá armazenar) e o mecânico (a carga que ele irá suportar).

DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Conhecidos:

- Precipitação da região de São Luís (mm) – $P = 179,9\text{mm}$ para um período de retorno de 10 anos, conforme dados apresentados em Proposta de Ensino em drenagem por Coelho (2015).
- Coeficiente de permeabilidade do solo (obtido através do ensaio feito em laboratório) – $f = 2,05 \cdot 10^{-5}$
- Tempo de enchimento do reservatório (T): 2hs – adotado de acordo com Marchioni (2011)
- Quociente da área de contribuição e da área do pavimento (R); adotamos que eles possuem tamanhos iguais, logo, $R=1$;
- Porosidade do agregado (V_r); $V_r = 40\%$. Adotado conforme tabela a seguir:

Tabela 12 - Porosidade típica de alguns materiais

| Material | Porosidade (%) |
|--|------------------------|
| Pedras britadas (<i>Blasted rock</i>) | 30 |
| Pedras britadas uniformemente graduadas | 40 (mais usado) |
| Pedras graduadas maiores que ¾”(19mm) | 30 |
| Areia | 25 |
| Pedregulho | 15 a 25 |

Fonte: Tomaz (2010)

Utiliza-se a seguinte equação para o pré-dimensionamento total da altura da base (hb):

$$hb = (P \cdot R + P - f \cdot T) / Vr$$

Substituindo-se os valores, na fórmula, obtem-se: hb = 900 mm

Uma segunda verificação na base deve ser feita, segundo Marchioni (2011), afim de obter a altura máxima da base (hmax).

Utiliza-se a seguinte equação para essa verificação:

$$hmax = f \cdot (Ts / Vr)$$

Onde:

Ts corresponde ao tempo máximo de armazenamento da água no reservatório que segundo Marchioni (2011) é de 72hs.

Substituindo-se os valores na formula, obtem-se: hmax = 0,0036 mm

Deve-se considerar o pior caso entre as verificações, e adotar-se o maior valor de hb como espessura total da base (aqui consideramos base e sub-base). Logo, **hb=900mm**.

Caso **hmax < hb**, é necessário complementar o sistema com uma tubulação de drenagem para desviar o excesso de água, utilizando então um sistema de infiltração parcial.

DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

Conhecidos:

- CBR do solo (subleito)
- Nº de solicitações para um projeto de vida útil de 20 anos

Temos dos ensaios descritos, os valores do CBR que são:

CBR(1) = 24,26%; CBR(2) = 5,65%; CBR (3) = 8,38% e CBR(4) = 6,23%

Como o CBR do Furo 1, destoa dos demais furos, despreza-se ele, e tira-se uma média do CBR dos outros furos. Desse modo tem-se **CBR médio = 6,75%**. Utiliza-se então a tabela 20, na qual entra-se no CBR de 5 a 9% e nas solicitações equivalentes de 50 KN (utilizou-se o menor valor de solicitação pois levou-se em consideração que o tráfego no CCT – UEMA é do tipo leve) e obtém-se a espessura mínima de **225 mm** para a camada de base.

Adota-se segundo Marchioni (2011), como espessura da camada de base e sub-base o maior valor entre o dimensionamento hidráulico e mecânico. Além disso, ressalta-se ainda que, a camada de base tem dimensão fixa de 100 mm e a camada de sub-base terá como dimensão a diferença para atingir o valor total dimensionado.

Desse modo, tem-se como espessura das camadas de base e sub-base os seguintes valores:

Htotal = 900mm (maior valor entre os dimensionamentos mecânico e hidráulico)

Hb = 100mm (fixo)

Hsub-base = 900 – 100 = 800mm (diferença para atingir o valor total dimensionado)

Calculadas as alturas da base e sub-base, escolhe-se o material que será utilizado nas mesmas segundo o que prega a literatura e nas outras camadas. Descrimina-se a seguir:

É sabido que, o revestimento será do tipo permeável Intertravado de concreto. A camada de assentamento, segundo Marchioni (2011) deve ter espessura de 5mm e recomenda-se a utilização de agregado graúdo de diâmetro máximo de 9,5mm, sendo adotado então a brita nº0 nessa camada. A mesma afirma ainda que, pode-se utilizar no rejunte o mesmo material do assentamento. Desse modo, a brita nº0 também será adotada no rejunte.

Para os materiais da base e sub-base, não se tem um consenso, porém sabe-se que segundo Marchioni (2011) a brita deve ser lavada com Abrasão Los Angeles menor que 40 e CBR de pelo menos 80%.

Desse modo, as granulometrias sugeridas são:

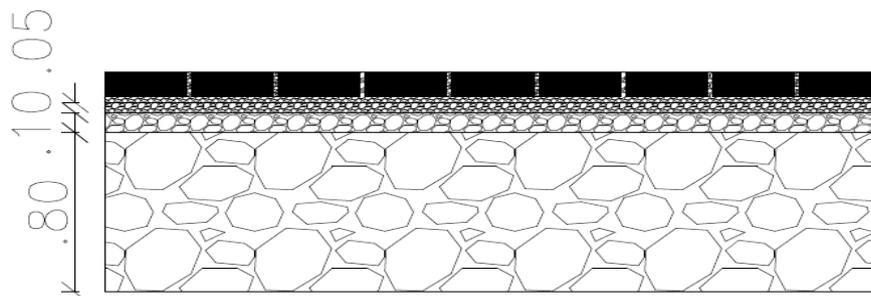
Para Araújo et al (2009) os agregados da sub-base devem ter diâmetro que variam entre 3,8cm a 7,6 cm (brita nº3) e na base o diâmetro deve ser de 1,25cm (brita nº1).

Schueller (1987, *apud* Araújo et al, 1999) recomenda o uso de brita nº3 ou nº4 na sub-base.

Acioli (2005), por sua vez, sugere a utilização de brita com diâmetro maior que 10mm (brita nº1, por exemplo, $9,5\text{mm} < \text{diâmetro} < 19\text{mm}$), para base e sub-base.

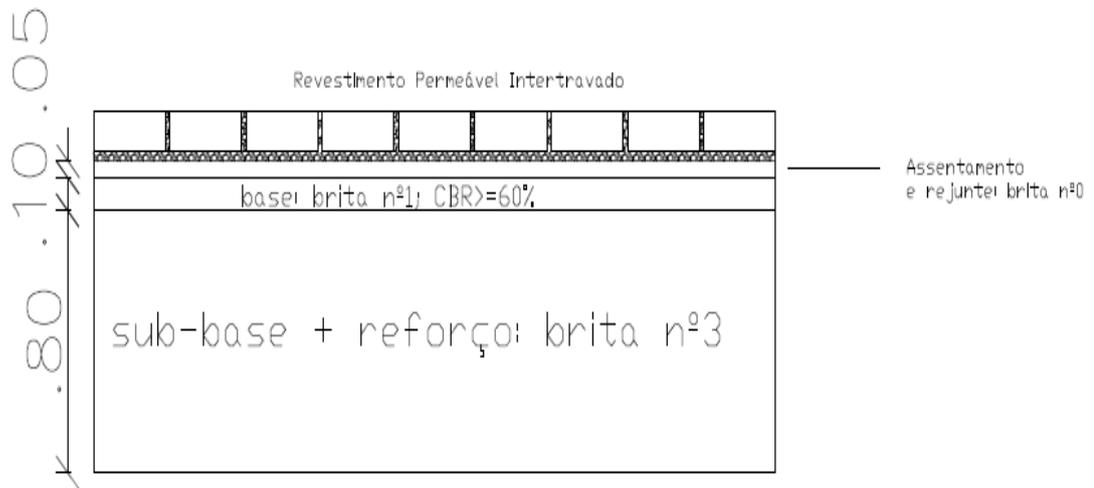
Analisando o que é sugerido pelos autores, adotaremos a brita nº1 na camada de base e a brita nº3 na sub-base do pavimento dimensionado. O fato é que, deve-se adotar um material de granulometria aberta de modo cada camada possua pelo menos 32% de vazios, segundo Marchioni (2011). Definido o dimensionamento, tem-se a seguir nas figuras 40 e 41 , o esquema com a seção do pavimento e com a descrição do material, respectivamente.

Figura 40 - Esquema com a seção do pavimento dimensionado



Fonte: Autora (2016)

Figura 41 - Descrição dos materiais que compõem as camadas dimensionadas



Fonte: Autora (2016)

8 MANUTENÇÃO

Sabemos que, os pavimentos que se acumulam ao longo do tempo nos pavimentos permeáveis tendem a fazer com que a sua capacidade de infiltração diminua. Segundo Marchioni (2011), em 10 anos ele perde 90% dessa capacidade, porém isso vai depender da velocidade com que ocorre o acúmulo de sedimentos no pavimento. O volume de tráfego, a existência de fontes de sedimentos próximo ao pavimento como é o caso de jardins, e áreas que carreguem sedimentos para o mesmo irão influenciar diretamente na periodicidade dessa manutenção.

A manutenção, consiste na substituição do topo do rejunte do pavimento que é por onde a água percola e justamente onde os sedimentos se alocam. Desse modo, a capacidade de infiltração é devolvida ao pavimento.

Outro fator que segundo Marchioni (2011), interfere na infiltração da água é o crescimento de vegetação nas juntas, por isso deve ser retirado sempre que isso for observado.

Para que a vida útil do pavimento seja prolongada, deve ser realizada uma limpeza anual com o a finalidade de retirar os sedimentos acumulados no rejuntamento, através de equipamentos de aspiração (a vácuo).

Figura 42 - Pavimento Intertravado Permeável Depois de Sofrer o Processo de Colmatação



Fonte: Marchioni (2011)

9 DESEMPENHO

Após a construção do pavimento permeável, é recomendada a verificação do seu desempenho através de um ensaio que determina o seu coeficiente de permeabilidade. Ele irá atestar a capacidade de infiltração do pavimento e verificar a necessidade de manutenção.

O ensaio consiste, de modo geral, em aplicar um volume de água num cilindro de 300mm, de modo que seja mantida uma coluna de 10 a 15mm de água por um período que é o tempo de infiltração.

Marchioni (2011), nos mostra no anexo A do Manual de Melhores Práticas da ABCP como executar esse ensaio através da ASTM C1701 – Método de ensaio para coeficiente de infiltração em pavimento permeável.

10 CONCLUSÃO

Ao término da pesquisa bibliográfica acerca dos pavimentos permeáveis, podemos avaliar que eles são ainda pouco utilizados na amenização de inundações urbanas no Brasil, haja vista, que seu estudo e os materiais disponíveis acerca do tema são pouco difundidos. Porém, destacamos que eles são amplamente utilizados nos Estados Unidos e em países europeus como Inglaterra e Alemanha.

O desenvolvimento dos centros urbanos no Brasil se deu de modo desordenado sem a preocupação com o meio ambiente urbano. A falta de planejamento juntamente com a urbanização descontrolada, aliada a fatores econômicos como a industrialização, êxodo rural e a falta de moradias foram responsáveis pelo aumento da impermeabilização do solo e como consequência temos espaços que não possibilitam a infiltração do solo (parques, jardins entre outros).

Pinto *apud* Tucci (2007) salienta que devem ser adotadas novas práticas e conceitos, pois a sustentabilidade do que foi estudado está relacionada à implantação de medidas mitigadoras na drenagem urbana, sendo chamadas de medidas de controle compensatórias.

Estas são utilizadas de forma alternativa para reduzir ou controlar os excedentes pluviais gerados pela impermeabilização, poluição, e promover a recarga dos aquíferos subterrâneos. Porém, isoladamente não promovem o controle de inundações. Devem ser implantadas próximo à fonte geradora e em diferentes escalas. Pinto *apud* Nascimento (2005).

Desse modo, como atenuador dos impactos, um dos dispositivos utilizados para tal são os Pavimentos Permeáveis (objeto nosso de estudo), pois eles possuem os requisitos já citados de promover a infiltração das águas da chuva no solo urbano atuando como um retardador dos picos de cheias como cita Pinto (2011).

É sabido que, para a implantação de um pavimento permeável em especial o Intertravado, necessitamos saber como afirma Marchioni (2005) o CBR e a compactação do subleito, bem como a sua permeabilidade. Por isso, foram realizados esses ensaios em especial (além de outros) para verificar se o estacionamento do prédio de engenharia dessa instituição de ensino, poderia receber esse pavimento sustentável. Tivemos uma resposta positiva quanto a isso, o que é de grande valia, haja visto que em épocas de chuva o estacionamento bem como a rua adjacente a ele ficam alagados.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

_____. **NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

_____. **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

_____. **NBR 7181: Análise Granulométrica de Solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

_____. **NBR 7182: Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

_____. **NBR 9781: Peças de Concreto para Pavimentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

_____. **NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ACIOLI, L. A. **Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte**. Porto Alegre, 2005.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDEFUM, J.A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRG. Porto Alegre, 1999.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. 2010.

COELHO, M. T. M. **Proposta de Ensino em Drenagem**. 2015.

FORTES, R. M. 2015. **Capacidade de Suporte – (CBR)**. Disponível em: <<http://www.latersolo.com.br/wp-content/uploads/2015/02/4-CAPACIDADE-DE-SUPORTE-CBR.pdf>>. Acesso em: 24/06/2016.

GONÇALVES, A.; OLIVEIRA, R.; **Pavimentos Permeáveis e a sua influência sobre a drenagem**. Escola Politécnica da USP. 2014

KORMANN, A. C. M. **Ensaio de Compactação e Caracterização**. Universidade Federal do Paraná, 1997.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento Intertravado Permeável -Melhores Práticas** – ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2011.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3ª edição**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano**. 2011.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; JUNIOR KABBACH, F. I. **Drenagem Subsuperficial de Pavimentos – Conceitos e Dimensionamento**. 2013.

TOMAZ, P. **Infiltração e condutividade K**. 2010.

TOMAZ, P. **Curso de Manejo de águas pluviais**. 2009.

VIRGILIIS, A. L. C. De. **Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009.

ANEXO 1

A seguir têm-se alguns ensaios utilizados na metodologia, porém tiveram importância secundária nos cálculos do dimensionamento.

ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

A Plasticidade é uma propriedade dos solos que consiste na maior ou menor capacidade que ele tem de ser moldado em certas condições de umidade sem que ocorra variação de volume. É uma importante propriedade das argilas. Nesse estudo, apenas o furo 2 conseguiu ser moldado.

Segundo Pinto (2002), o limite de liquidez (LL) é definido como a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico; é a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo. Experimentalmente corresponde ao teor de umidade com que o solo fecha certa ranhura sob o impacto de 25 golpes do aparelho de Casagrande. Onde são feitas várias tentativas, com diferentes níveis de umidade, onde a ranhura se fecha com diferentes números de golpes.

Os ensaios de limites de Plasticidade e Liquidez são regidos respectivamente pelas normas ABNT NBR 7180/84 e NBR 6459/84.

Kormann (1997) afirma que o Limite de Liquidez de um solo, é o teor de umidade acima do qual o solo perde suas características plásticas se comportando então com um fluido viscoso. Nesse caso, ele se encontra entre os estados plástico e líquido.

4.3.4 MATERIAIS UTILIZADOS

ENSAIO LIMITE DE LIQUIDEZ

- Aparelho de Casagrande;
- Cinzel;
- Balança;
- Estufa;
- Cápsulas de porcelana;
- Espátula metálica;
- Água destilada;

ENSAIO LIMITE DE PLASTICIDADE

- Placa de vidro esmerilhada;
- Estufa;
- Cápsulas de porcelana;
- Espátula metálica;
- Água destilada;
- Balança;
- Peneira;

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

ENSAIO LIMITE DE LIQUIDEZ

A obtenção do Limite de Liquidez foi padronizada por Casagrande e se dá da seguinte maneira:

- Coleta-se uma devida amostra de solo, previamente seco ao ar e passa-o na peneira nº40. Homogeneíza o material adicionando-se água aos poucos.
- Coloca-se uma quantidade do material numa concha de porcelana e aos poucos se adiciona água, mistura-se vigorosamente a fim de se obter uma homogeneidade da umidade do solo. A umidade deve ser próxima do limite de plasticidade, que é estimada a partir da experiência do laboratorista.
- Passa-se o material para a concha do aparelho de Casagrande, preenchendo-a até 2/3 de sua superfície.
- Com uma espátula alisa-se o solo retirando-se o excesso até se obter uma espessura de aproximadamente 1 cm na parte central da concha (a espessura é confirmada pelo gabarito do cinzel).
- Faz-se uma ranhura no solo com o cinzel no sentido longitudinal do aparelho.
- Girando-se a manivela com velocidade constante de duas voltas por segundo, contando o número de golpes até o fechamento da ranhura numa extensão de 1 cm.
- Coleta-se uma quantidade de material do local onde ocorreu o fechamento e coloca-se numa cápsula para não perder umidade para o ambiente e posteriormente determina-se sua umidade.
- Volta-se o material para a concha de porcelana e adiciona-se mais água repetindo todo o processo por mais quatro vezes.

ENSAIO LIMITE DE PLASTICIDADE

- Coloca-se parte da amostra que passa na peneira nº 40 no recipiente de porcelana e vai-se adicionando água até a homogeneização da massa;
- Molda-se certa quantidade da massa em forma elipsoidal rolando-a em seguida sobre a placa de vidro, até que fissure em pequenos fragmentos quando essa atingir dimensões de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento;
- Coletam-se alguns fragmentos fissurados para a determinação da umidade;
- Repete-se o processo no mínimo por mais quatro vezes.

6.3.3 RESULTADOS

A seguir apresentam-se os resultados dos ensaios de LL e LP obtidos nos furos 1 a 4.

FURO 1

Tabela 13 - Dados do Ensaio de LL e LP do 1º Furo

| DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|
| TEOR DE UMIDADE DA AMOSTRA | | | | RESULTADOS | | |
| Cápsula nº | 61 | 42 | 233 | LL | 15,8 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 54,8 | 59,1 | 57,3 | | | |
| Solo seco+cap (g) | 53,2 | 57,3 | 56 | LP | 0 | |
| Cápsula (g) | 15 | 17,5 | 13,9 | | | |
| Água (g) | 1,6 | 1,8 | 1,3 | Índ. Plasticidade (IP): | 15,8 | |
| Solo Seco (g) | 38,2 | 39,8 | 42,1 | | | |
| Teor de Umidade (%) | 4,19 | 4,52 | 3,09 | | | |
| Teor de Umidade Médio(%) | 3,93 | | | | | |
| Determinação do Limite de Liquidez (LL) | | | | | | |
| Cápsula nº | 1 | 8 | 14 | 23 | 35 | Limite de Liquidez (LL) |
| Cápsula (g) | 4,1 | 4,7 | 4,2 | 4,8 | 4,4 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 22,5 | 27,5 | 23,2 | 22,8 | 21 | |
| Solo seco+cap (g) | 19,5 | 24,1 | 20,7 | 20,3 | 18,8 | |
| Nº de Golpes | 8 | 11 | 16 | 26 | 34 | |
| Teor de Umidade (%) | 19,48 | 17,53 | 15,15 | 16,13 | 15,28 | |

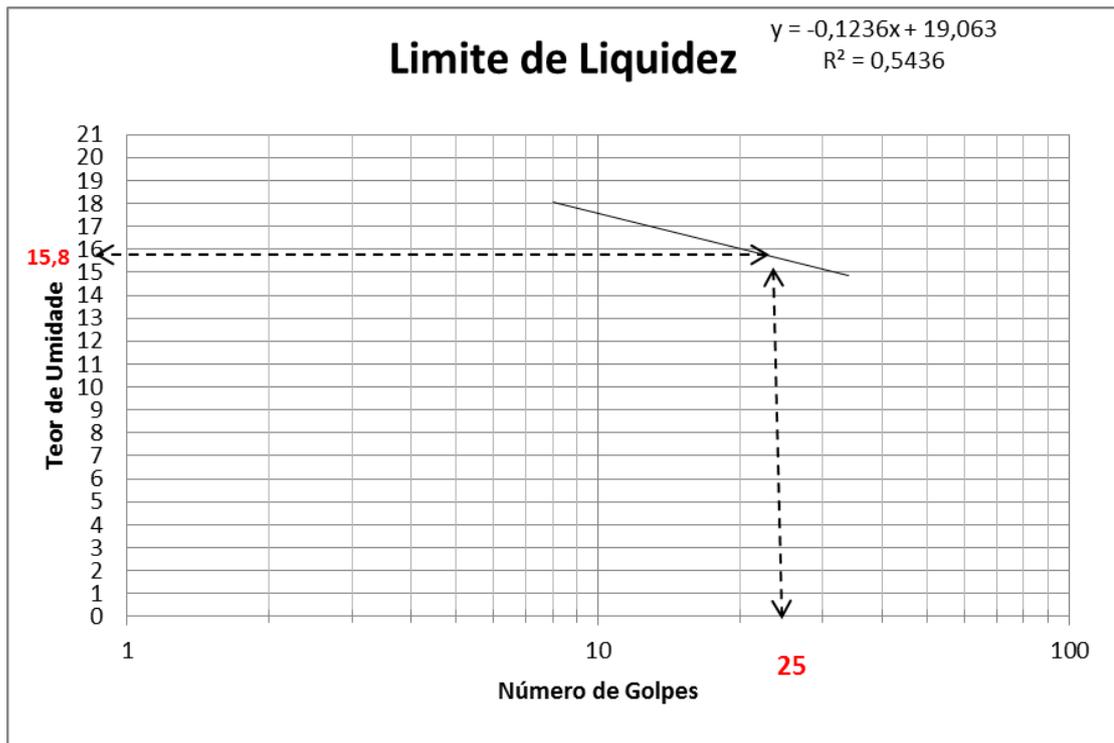
Fonte: Autora (2016)

Ressalta-se que para o material recolhido nesse furo, não foi possível realizar o ensaio de limite de Plasticidade, logo tem-se LP=0.

O limite de liquidez (LL) foi obtido ao se plotar o gráfico do N° de Golpes X Umidade e traçar o ponto onde temos 25 golpes. O LL é a umidade correspondente a esse ponto.

O índice de plasticidade (IP) é obtido ao se subtrair o valor de LL pelo de LP.

Figura 43 - Gráfico do Limite de Liquidez do Furo 01 Feito no Estacionamento



Fonte: Autora (2016)

FURO 2

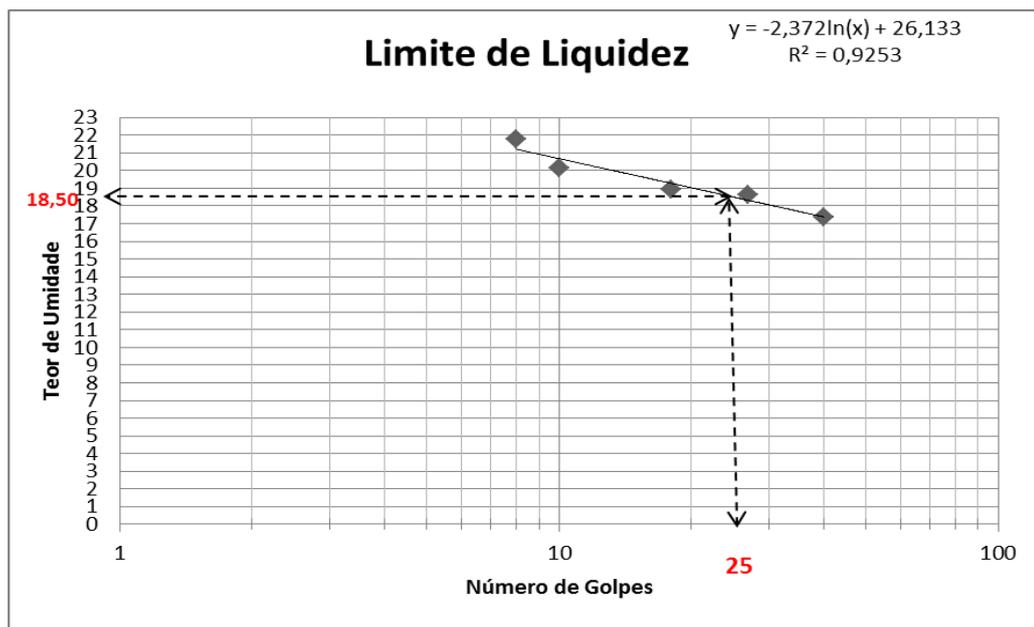
Tabela 14 - Dados do Ensaio de LL do 2º Furo

| DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|------------|-------|-------------------------------|
| TEOR DE UMIDADE DA AMOSTRA | | | | RESULTADOS | | |
| Cápsula nº | 47 | 10 | 59 | LL | 18,5 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 61,3 | 58,2 | 53,9 | | | |
| Solo seco+cap (g) | 60 | 56,9 | 53,3 | LP | 12 | |
| Cápsula (g) | 17,9 | 19,1 | 15,4 | | | |
| Água (g) | 1,3 | 1,3 | 0,6 | IP | 6,4 | |
| Solo Seco (g) | 42,1 | 37,8 | 37,9 | | | |
| Teor de Umidade (%) | 3,09 | 3,44 | 1,58 | | | |
| Teor de Umidade Medio(%) | 2,7 | | | | | |
| Determinação do Limite de Liquidez (LL) | | | | | | |
| Cápsula nº | 16 | 24 | 31 | 36 | 40 | Limite de Liquidez (LL) |
| Cápsula (g) | 4,5 | 4,3 | 4,7 | 4,2 | 4,7 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 25,2 | 24 | 22,9 | 21,4 | 23,6 | |
| Solo seco+cap (g) | 21,5 | 20,7 | 20 | 18,7 | 20,8 | |
| Nº de Golpes | 8 | 10 | 18 | 27 | 40 | |
| Teor de Umidade (%) | 21,76 | 20,12 | 18,95 | 18,62 | 17,39 | |

Fonte: Autora (2016)

Esse furo, foi o único em que conseguiu-se realizar o ensaio de Limite de Plasticidade.

Figura 44 - Gráfico do Limite de Liquidez do Furo 02 Feito no Estacionamento



Fonte: Autora (2016).

Tabela 15 - Dados do Ensaio de LP do 2º Furo

| Determinação do Limite de Plasticidade (LP) | | | | | | |
|---|------|-------|-------|-------|------|------------------------------------|
| Cápsula nº | 1 | 11 | 20 | 23 | 24 | Limite de Plasticidade (LP) |
| Cápsula (g) | 7,7 | 9,1 | 9,5 | 8,7 | 9,1 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 10,2 | 12,2 | 12,3 | 11,2 | 12,3 | |
| Solo seco+cap (g) | 10 | 11,8 | 11,9 | 10,9 | 12,1 | |
| Teor de Umidade (%) | 8,7 | 14,81 | 16,67 | 13,64 | 6,67 | |
| | | | | | | 12,1 |

Fonte: Autora (2016).

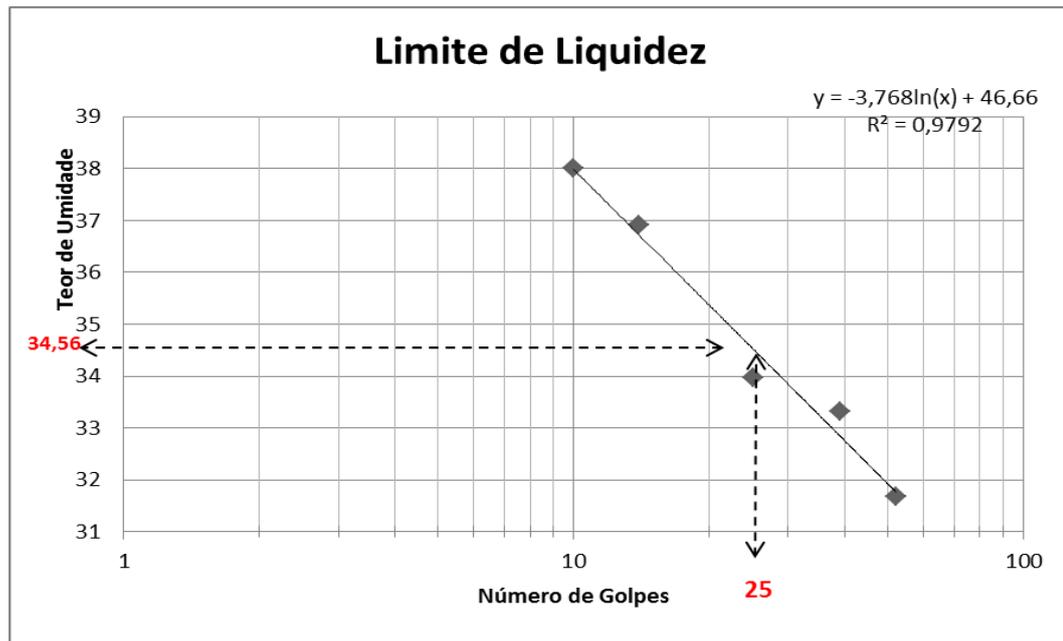
FURO 3

Tabela 16 - Dados do Ensaio de LL e LP do Furo 3

| DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|------------|-------|--------------------------------|
| TEOR DE UMIDADE DA AMOSTRA | | | | RESULTADOS | | |
| Cápsula nº | 31 | 20 | 58 | LL | 34,56 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 72,42 | 79,75 | 78,77 | | | |
| Solo seco+cap (g) | 71,06 | 78,34 | 77,44 | LP | 0 | |
| Cápsula (g) | 13,13 | 18,2 | 16,8 | | | |
| Água (g) | 1,36 | 1,41 | 1,33 | IP | 34,56 | |
| Solo Seco (g) | 57,93 | 60,14 | 60,64 | | | |
| Teor de Umidade (%) | 2,35 | 2,34 | 2,19 | | | |
| Teor de Umidade Medio(%) | 2,29 | | | | | |
| Determinação do Limite de Liquidez (LL) | | | | | | |
| Cápsula nº | 9 | 24 | 31 | 36 | 46 | Limite de Liquidez (LL) |
| Cápsula (g) | 4,73 | 4,26 | 4,71 | 4,2 | 4,92 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 21 | 20,84 | 23,05 | 24,01 | 22,84 | |
| Solo seco+cap (g) | 16,52 | 16,37 | 18,4 | 19,06 | 18,53 | |
| Nº de Golpes | 10 | 14 | 25 | 39 | 52 | |
| Teor de Umidade (%) | 38 | 36,91 | 33,97 | 33,31 | 31,67 | |
| | | | | | | 34,56 |

Fonte: Autora (2016)

Figura 45 - Gráfico do Limite de Liquidez do Furo 3 Feito no Estacionamento



Fonte: Autora (2016)

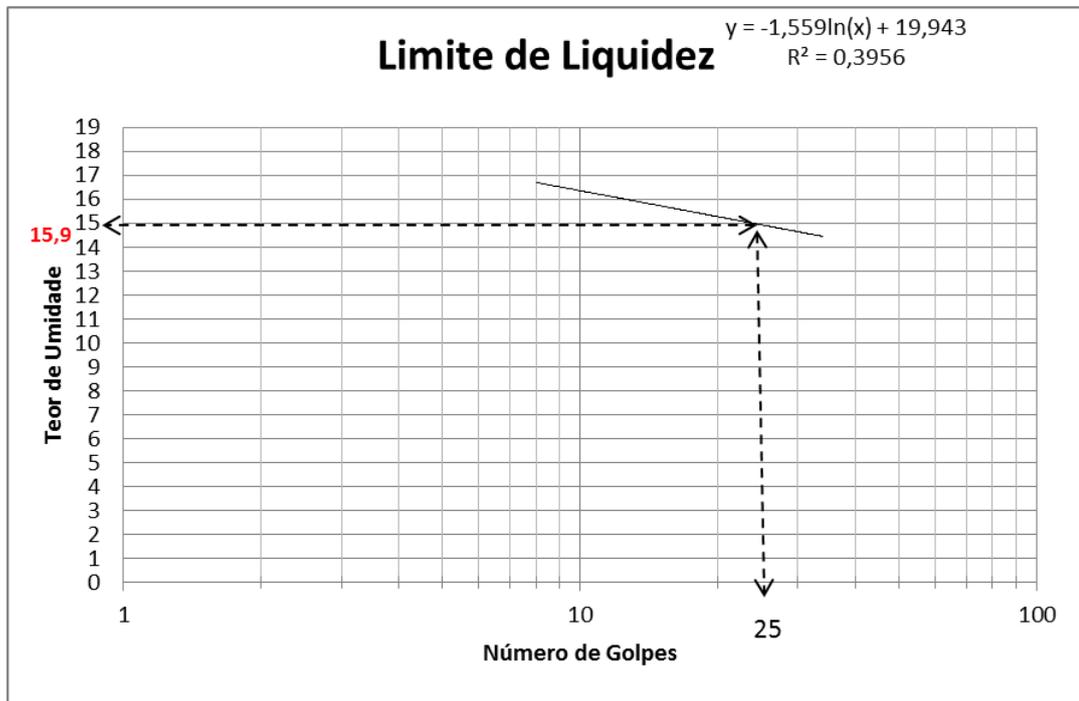
FURO 4

Tabela 17 - Dados do Ensaio de LL e LP Do Furo 04

| DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|------------|------|-------------------------|
| TEOR DE UMIDADE DA AMOSTRA | | | | RESULTADOS | | |
| Cápsula nº | 35 | 10 | 61 | LL | 15,9 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 58,2 | 53,8 | 40,8 | | | |
| Solo seco+cap (g) | 56,1 | 51,9 | 39,3 | LP | 0 | |
| Cápsula (g) | 17,9 | 19,1 | 15 | | | |
| Água (g) | 2,1 | 1,9 | 1,5 | IP | 15,9 | |
| Solo Seco (g) | 38,2 | 32,8 | 24,3 | | | |
| Teor de Umidade (%) | 5,5 | 5,79 | 6,17 | | | |
| Teor de Umidade Medio(%) | 5,82 | | | | | |
| Determinação do Limite de Liquidez (LL) | | | | | | |
| Cápsula nº | 4 | 6 | 30 | 49 | 51 | Limite de Liquidez (LL) |
| Cápsula (g) | 4,8 | 4 | 4,5 | 4,8 | 8,5 | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 24,9 | 23,8 | 23,2 | 26,6 | 25,9 | |
| Solo seco+cap (g) | 21,9 | 21,1 | 20,8 | 24 | 23,5 | |
| Nº de Golpes | 8 | 11 | 18 | 27 | 34 | |
| Teor de Umidade (%) | 17,54 | 15,79 | 14,72 | 13,54 | 16 | |

Fonte: Autora (2016)

Figura 46 - Gráfico do Limite de Liquidez do Furo 4 Feito no Estacionamento



Fonte: Autora (2016).

ENSAIO DE GRANULOMETRIA

Através desse ensaio determinamos a distribuição granulométrica do solo, em outras palavras, a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada para o ensaio.

EQUIPAMENTOS

- Jogo de peneiras
- Balança
- Almofariz
- Estufa

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Fez-se os procedimentos de peneiramento grosso e peneiramento fino nos solos estudados.

No peneiramento grosso de todos os furos, teve-se uma quantidade insignificante de material retido na peneira nº10, sendo esses valores desprezados. Desse modo foi adotado no cálculo das percentagens, valor de 100% na percentagem que passa na #10.

- PENEIRAMENTO GROSSO:

De acordo com a norma, lava-se o material na #10 colocando-o em seguida na estufa. Coloca-se as peneiras que possuem aberturas maiores e igual a #10 empilhadas em ordem crescente, de baixo pra cima. O conjunto de peneira é montado e agitado manualmente, em seguida pesa-se o material retido em cada peneira de forma cumulativa.

- PENEIRAMENTO FINO:

Do solo que passou na # 10, separamos uma quantidade, lavamos e colocamos na estufa por 24hs a 105° a 110°C. Empilhamos as peneiras de aberturas compreendidas entre as #10 e #200 agitando-as manualmente e pesando o material retido em cada peneira de forma cumulativa.

Utilizou-se as seguintes fórmulas nos cálculos:

$$Ps = \frac{Pt}{1+h};$$

$$\% \text{passa} = \left[\frac{Ps - \text{valor acumulado na \#}}{Ps} \right] * \% \text{passa na \#10}$$

Onde:

Ps = peso da amostra seca

PT = peso total da amostra

H= umidade

RESULTADOS

FURO 1:

Tabela 18 - Percentual Granulométrico do Furo 1

| GRANULOMETRIA (FURO 1) | | | | | |
|---|--------------------|--------------|------------------|----------------|---------|
| Massa Total da Amostra Seca ao Ar (Mt): | | | 524,6 | | |
| Massa Total da Amostra Seca (Ms): | | | 523,87 | | |
| DETERMINAÇÕES DE UMIDADE | | HIGROSCÓPICA | | | |
| Cápsula nº | 14 | 1 | 33 | | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 101,3 | 149,7 | 101,4 | | |
| Solo seco+cap (g) | 101,2 | 149,5 | 101,3 | | |
| Cápsula (g) | 51,1 | 49,2 | 17 | | |
| Água (g) | 0,1 | 0,2 | 0,1 | | |
| Solo Seco (g) | 50,1 | 100,3 | 84,3 | | |
| Teor de Umidade (%) | 0,2 | 0,2 | 0,12 | | |
| Umidade Média (%) | 0,173333333 | | | | |
| | # (USA) | Peneira (mm) | Massa retira (g) | Massa acum (g) | % passa |
| Peneiramento Grosso | - | 25 | - | - | 100 |
| | - | 19 | - | - | 100 |
| | 3/8" | 9,52 | - | - | 100 |
| | 4" | 4,76 | - | - | 100 |
| | - | 2,38 | - | - | 100 |
| | 10 | 2 | 0 | - | 100 |
| Peneiramento Fino | 16 | 1,19 | 17 | 17 | 97,32 |
| | 30 | 0,59 | 13,2 | 30,2 | 95,23 |
| | 40 | 0,42 | 35,8 | 66 | 89,59 |
| | 50 | 0,29 | 66,1 | 132,1 | 79,16 |
| | 100 | 0,149 | | 132,1 | - |
| | 200 | 0,074 | 314,2 | 446,3 | 29,61 |
| | Fundo | - | 188,9 | 635,2 | |

Fonte: Autora (2016)

O solo do furo 1 é composto por:

Percentual entre as peneiras #10 e #40: $100\% - 89,59\% = 10,41\%$ de pedregulho

Percentual entre as peneiras #40 e #200: $89,59\% - 29,61\% = 59,98\%$ de areia

Percentual do que passou pela #200: 29,61% de silte

FURO 2:**Tabela 19 - Percentual Granulométrico do Furo 2**

| GRANULOMETRIA (FURO 2) | | | | | |
|---|--------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------|
| Massa Total da Amostra Seca ao Ar (Mt): | | | 388,8 | | |
| Massa Total da Amostra Seca (Ms): | | | 387,63 | | |
| DETERMINAÇÕES DE UMIDADE | | HIGROSCÓPICA | | | |
| Cápsula nº | 233 | 19 | 4 | | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 71,7 | 63,9 | 50,9 | | |
| Solo seco+cap (g) | 71,5 | 63,9 | 50,7 | | |
| Cápsula (g) | 13,8 | 20 | 15 | | |
| Água (g) | 0,2 | 0 | 0,2 | | |
| Solo Seco (g) | 57,7 | 43,9 | 35,7 | | |
| Teor de Umidade (%) | 0,35 | 0 | 0,56 | | |
| Umidade Média (%) | 0,30 | | | | |
| | # | Peneira | Massa retira | Massa acum | % |
| | (USA) | (mm) | (g) | (g) | passa |
| Peneiramento Grosso | - | 25 | - | - | 100 |
| | - | 19 | - | - | 100 |
| | 3/8" | 9,52 | - | - | 100 |
| | 4" | 4,76 | - | - | 100 |
| | - | 2,38 | - | - | 100 |
| | 10 | 2 | 0 | - | 100 |
| Peneiramento Fino | 16 | 1,19 | 0,8 | 0,8 | 99,79 |
| | 30 | 0,59 | 7,2 | 8 | 97,93 |
| | 40 | 0,42 | 12,5 | 20,5 | 94,71 |
| | 50 | 0,29 | 35,2 | 55,7 | 85,63 |
| | 100 | 0,149 | 87,2 | 142,9 | 63,13 |
| | 200 | 0,074 | 65 | 207,9 | 46,36 |
| | Fundo | - | 20,2 | 228,1 | |

Fonte: Autora (2016)

O solo do furo 2 é composto por:

Percentual entre as peneiras #10 e #40: $100\% - 94,71\% = 5,29\%$ de pedregulho

Percentual entre as peneiras #40 e #200: $94,71\% - 46,36\% = 48,35\%$ de areia

Percentual do que passou pela #200: 46,36% de silte

FURO 3:**Tabela 20 - Percentual Granulométrico do Furo 3**

| GRANULOMETRIA (FURO 3) | | | | | |
|---|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------|--------------|
| Massa Total da Amostra Seca ao Ar (Mt): | | | 200,8 | | |
| Massa Total da Amostra Seca (Ms): | | | 200,4 | | |
| DETERMINAÇÕES DE UMIDADE | | HIGROSCÓPICA | | | |
| Cápsula nº | 8 | 47 | 34 | | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 82,7 | 81,2 | 83,3 | | |
| Solo seco+cap (g) | 81,6 | 80,2 | 82,1 | | |
| Cápsula (g) | 17,3 | 18,3 | 19,2 | | |
| Água (g) | 1,1 | 1 | 1,2 | | |
| Solo Seco (g) | 64,3 | 61,9 | 62,9 | | |
| Teor de Umidade (%) | 1,71 | 1,62 | 1,91 | | |
| Umidade Média (%) | 1,746666667 | | | | |
| | # | Peneira | Massa retira | Massa acum | % |
| | (USA) | (mm) | (g) | (g) | passa |
| Peneiramento Grosso | - | 25 | - | - | 100 |
| | - | 19 | - | - | 100 |
| | 3/8" | 9,52 | - | - | 100 |
| | 4" | 4,76 | - | - | 100 |
| | - | 2,38 | - | - | 100 |
| | 10 | 2 | 0 | - | 100 |
| Peneiramento Fino | 16 | 1,19 | 0,4 | 0,4 | 99,79 |
| | 30 | 0,59 | 6 | 6,4 | 96,75 |
| | 40 | 0,42 | 11,2 | 17,6 | 91,06 |
| | 50 | 0,29 | 29,2 | 46,8 | 76,24 |
| | 100 | 0,149 | 81,4 | 128,2 | 34,92 |
| | 200 | 0,074 | 59,6 | 187,8 | 4,67 |
| | Fundo | - | 11,7 | 199,5 | |

Fonte: Autora (2016)

O solo do furo 3 é composto por:

Percentual entre as peneiras #10 e #40: $100\% - 91,06\% = 8,94\%$ de pedregulhoPercentual entre as peneiras #40 e #200: $91,06\% - 4,67\% = 86,39\%$ de areiaPercentual do que passou pela #200: $4,67\%$ de silte

FURO 4:**Tabela 21 - Percentual Granulométrico do Furo 4**

| GRANULOMETRIA (FURO 4) | | | | | |
|---|----------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|
| Massa Total da Amostra Seca ao Ar (Mt): | | | 200,3 | | |
| Massa Total da Amostra Seca (Ms): | | | 197,51 | | |
| DETERMINAÇÕES DE UMIDADE | | HIGROSCÓPICA | | | |
| Cápsula nº | 35 | 10 | 36 | | |
| Solo Úmido+Cap (g) | 50,2 | 50,8 | 85,2 | | |
| Solo seco+cap (g) | 49,7 | 50,4 | 84,3 | | |
| Cápsula (g) | 18,3 | 19,5 | 18 | | |
| Água (g) | 0,5 | 0,4 | 0,9 | | |
| Solo Seco (g) | 31,4 | 30,9 | 66,3 | | |
| Teor de Umidade (%) | 1,59 | 1,29 | 1,36 | | |
| Umidade Média (%) | 1,41 | | | | |
| | # (USA) | Peneira (mm) | Massa retira (g) | Massa acum (g) | % passa |
| Peneiramento Grosso | - | 25 | - | - | 100 |
| | - | 19 | - | - | 100 |
| | 3/8" | 9,52 | - | - | 100 |
| | 4" | 4,76 | - | - | 100 |
| | - | 2,38 | - | - | 100 |
| | 10 | 2 | 0 | - | 100 |
| Peneiramento Fino | 16 | 1,19 | 1,1 | 1,1 | 99,44 |
| | 30 | 0,59 | 4,6 | 5,7 | 97,11 |
| | 40 | 0,42 | 12,3 | 18 | 90,88 |
| | 50 | 0,29 | 31 | 49 | 75,19 |
| | 100 | 0,149 | 88,8 | 137,8 | 30,23 |
| | 200 | 0,074 | 59,7 | 197,5 | 5,06 |
| | Fundo | - | 1,6 | 199,1 | |

Fonte: Autora (2016)

O solo do furo 4 é composto por:

Percentual entre as peneiras #10 e #40: $100\% - 90,88\% = 9,12\%$ de pedregulho

Percentual entre as peneiras #40 e #200: $90,88\% - 5,06\% = 85,82\%$ de areia

Percentual do que passou pela #200: 5,06% de silte

O solo analisado é composto, como foi observado nos resultados, em sua maioria por areia, silte e pedregulho respectivamente. Sabemos então, que trata-se de um solo fino arenoso-siltoso.

ANEXO 2

Método de ensaio para coeficiente de infiltração em pavimento permeável (ASTM C1701)

Um anel de infiltração é temporariamente selado na superfície de um pavimento permeável. Depois de pré-molhar o local do teste, uma certa massa de água é adicionada no anel e é registrado o tempo para a água infiltrar no pavimento. O coeficiente de infiltração é calculado de acordo com a equação no item Cálculo.

Equipamentos

- **Cilindro para infiltração:** um anel cilíndrico, aberto dos dois lados. O cilindro deve ser resistente a água, com rigidez suficiente para não deformar quando cheio de água e deve ter um diâmetro de 300 ± 100 mm com uma altura mínima de 50 mm. A superfície inferior do cilindro deve ser uniforme. Na superfície interna do cilindro devem ser marcadas duas linhas com distâncias de 10 mm e 15 mm da superfície inferior do anel. Meça e registre o diâmetro interno do cilindro com precisão de 1 mm.
- **Balança:** balança com escala de 10 g.
- **Recipiente:** um recipiente cilíndrico normalmente feito de plástico tendo um volume mínimo de 20 l e de onde a água possa facilmente ser derramada em um volume controlado no cilindro de infiltração.
- **Cronômetro:** precisão de 0,1 s.
- **Massa de calafetar**
- **Água**

Locais para testes

Realizar o teste em diferentes pontos no local conforme especificado pelo solicitante do teste. Salvo em casos específicos, use o seguinte número de testes:

- Três locais para áreas até 2500 m²
- Fazer mais um teste para cada 1000 m² adicionais
- Deixe pelo menos 1 m livre de distância entre os locais testados, salvo quando tiver um intervalo de pelo menos 24 h.
- Não execute o teste caso haja água na superfície do pavimento. Não execute menos de 24 h da última precipitação.

Procedimento

- **Instalação do cilindro de infiltração:** limpe o pavimento apenas varrendo o lixo, sedimentos e outros materiais que não estejam aderidos ao pavimento. Aplique massa de calafetar na superfície inferior do cilindro e o coloque no pavimento permeável em teste. Pressione a massa de calafetar na superfície e em volta da superfície inferior do cilindro para selar completamente a parte inferior do mesmo.
- **Pré-molhagem:** despeje água no interior do cilindro com velocidade suficiente para manter o nível da água entre as duas marcações. Use um total de $3,60 \pm 0,05$ kg de água. Inicie o cronômetro assim que a água atinja a superfície do pavimento permeável. Pare o cronômetro quando não houver mais água livre na superfície do pavimento permeável. Registre o tempo com precisão de 0,1 s.
- **Teste:** O teste é iniciado em até 2 min depois da pré-molhagem. Se o tempo no estágio de pré-molhagem foi inferior a 30 s, use um total de $18 \pm 0,05$ kg de água. Se o tempo no estágio de pré-molhagem foi superior a 30 s, use um total de $3,60 \pm 0,05$ kg de água. Registre o peso da água com precisão de 10 g. Despeje a água no anel de forma que o nível de água se mantenha entre as duas marcações e até que se despeje todo o volume de água. Inicie o cronômetro assim que a água atinja o pavimento permeável. Pare o cronômetro assim que não se observe mais água na superfície do pavimento permeável. Registre o tempo com precisão de 0,1 s.

Nota: se o pavimento tiver uma inclinação, mantenha o nível de água entre as duas marcas no cilindro na parte mais baixa do aclave.

Se o teste for repetido no mesmo ponto, o segundo teste não requer o procedimento de pré-molhagem se for realizado em até 5 min do primeiro teste. Se mais de um teste for feito em um local no mesmo dia, a taxa de infiltração naquele local deve ser calculada como a média dos dois testes. Não repita este teste mais que duas vezes no mesmo local no mesmo dia.

Cálculo

Calcule o coeficiente de infiltração (**I**) usando a seguinte equação:

$$I = KM/(D^2 t)$$

Onde:

I = coeficiente de infiltração (mm/h)

M = massa de água infiltrada (kg)

D = Diâmetro interno do cilindro de infiltração (mm)

t = tempo necessário para toda a água infiltrar no pavimento permeável (s)

K = 4 583 666 000 (SI) (para converter as unidades).