

# **Metodologia de Análise do Subleito para Dimensionamento de Pavimento Permeável: Estudo de Caso**

Autor: Luana Moreira

Orientador: Neusa Maria Bezerra Mota

Coorientador: Márcio Muniz de Farias

Linha de pesquisa Cidade, infraestrutura, tecnologia e projeto.

## **RESUMO**

A presente pesquisa sugere a construção de pavimentos permeáveis como solução para problemas urbanos causados por escoamento superficial da água da chuva em torno das edificações, além de propor uma metodologia baseada no estudo do subleito para dimensionar o pavimento permeável para uma área de estacionamento. Para isto, estudos de caracterização de solo, permeabilidade, resistência do solo por meio do ensaio de penetração dinâmica de cone (DCP) e avaliação do módulo de resiliência foram realizados e avaliados. O pavimento permeável deve atender às solicitações de esforços mecânicos de carga de rolamento de veículos e pedestres e, ao mesmo tempo, deve permitir a infiltração da água no solo, evitando o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura. Este tipo de pavimento é ideal para ser executado em estacionamentos e calçadas, onde geralmente a carga gerada pela circulação de veículos e pessoas não é elevada. Ao final da pesquisa foi possível obter a espessura total do pavimento atendendo ambos os critérios, mecânico e hidráulico.

**Palavras-chave:** Drenagem Urbana. Escoamento superficial. Pavimento Permeável. Caracterização de subleito.

## **1 INTRODUÇÃO**

Alguns desastres naturais como alterações climáticas, enchentes e alagamentos são consequências e reflexos da grande urbanização e ocupação desenfreada das cidades. Em virtude dessa intensa ocupação, as áreas de infiltração ou áreas permeáveis estão diminuindo gradualmente e o terreno está ficando cada vez mais impermeável. Isto é, está impedido de absorver águas pluviais, causando assim, o escoamento superficial da água da chuva.

Quando não há um bom planejamento de drenagem, seja em edificações comuns como casas e prédios ou em obras de pavimentação, a água escoada é direcionada para bacias adjacentes àquela região da edificação. Tal solução, sobrecarrega o solo, que por sua vez não consegue absorver a quantidade de água, resultando em enchentes, alagamentos e outros possíveis desastres.

A solução mais empregada hoje em dia pelos órgãos públicos para diminuir o escoamento superficial está na implementação de sistemas de drenagem, geralmente com a execução de sarjetas instaladas nos lados adjacentes das vias urbanas. Contudo, esta prática muitas vezes apenas faz com que a enchente se direcione para outro local, mudando apenas a localização do problema. Vale ressaltar também que, muitas vezes, sarjetas e bocas de lobo encontram-se entupidas por falta de manutenção frequente, impedindo a passagem da água pelos sistemas de drenagem.

Nos dias atuais, para evitar mais desastres causados pelo escoamento superficial das águas pluviais, é indispensável a busca por alternativas que sejam eficientes e que otimizem o espaço urbano das cidades. Assim sendo, uma das intenções desta pesquisa é apresentar a construção de pavimentos permeáveis como meio para reduzir ou até mesmo solucionar os problemas causados pelo escoamento superficial da água da chuva.

O pavimento permeável deve atender às solicitações de esforços mecânicos de carga de rolamento de veículos automotivos e pedestres e, ao mesmo tempo, permitir a infiltração da água no solo, sem causar dano à sua estrutura. Este tipo de pavimento é ideal para ser executado em estacionamentos e calçadas, onde geralmente a carga gerada pela circulação de veículos e pedestres não é elevada. Para Marchioni e Silva (2011), os pavimentos permeáveis são definidos como aqueles que possuem espaços livres na sua estrutura onde a água pode atravessar.

Esta pesquisa apresenta o dimensionamento de um pavimento permeável, localizado em área urbana, no estacionamento do Bloco 8 do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, e ressalta a importância de haver áreas de infiltração nos centros urbanos. O propósito de realizar estudos e pesquisar sobre pavimentos permeáveis, está em simplificar sua concepção, para que este sistema construtivo seja mais fácil e acessível para ser implantado em qualquer tipo de empreendimento. Para isto, foram utilizadas metodologias para verificar a capacidade de infiltração do solo, a resistência do solo e ensaios de caracterização dos materiais das camadas do pavimento. A metodologia utilizada nesta pesquisa foi embasada em normatizações brasileiras e na pesquisa desenvolvida por Abreu e Coutinho (2017), pioneiros no

desenvolvimento de pesquisa aplicada à construção de pavimentos permeáveis na região central de Brasília/DF.

### **1.1 Problema da Pesquisa**

O pavimento permeável é uma solução viável devido a sua capacidade de reduzir, e até mesmo acabar com a formação do escoamento superficial, o grande responsável por gerar os desastres relacionados à água nos centros urbanos. São aspectos técnicos relevantes e de grande importância no estudo do pavimento permeável os critérios hidráulicos e mecânicos, sua resistência às cargas de rolamento e, ao mesmo tempo, sua capacidade de infiltração que permitirá a percolação da água através de seus poros. O principal problema tratado nesta pesquisa pode ser resumido na seguinte pergunta: É possível criar uma metodologia de avaliação do subleito que permita dimensionar um pavimento permeável flexível que atenda aos critérios técnicos (mecânicos e hidráulicos) necessários?

### **1.2 Justificativa**

A maior dificuldade em conceber um pavimento permeável está em fazer com que os dois critérios, hidráulico e mecânico, tão conflitantes entre si, trabalhem conjuntamente sem que nenhum deles perca sua eficiência. Por isso, é necessário que sejam realizados estudos e pesquisas para que este tipo de sistema construtivo seja aplicado em todos os tipos de pavimento. Deste modo, propõe-se, inicialmente o dimensionamento para estacionamentos onde a carga dos veículos seja relativamente baixa e que o local da sua implantação possua uma área extensa capaz de captar uma boa quantidade de águas pluviais.

### **1.3 Hipótese**

É possível dimensionar as camadas de um pavimento permeável capaz de suportar o tráfego e permitir a infiltração de águas pluviais em seu subleito com base em uma metodologia apoiada no estudo e caracterização do subleito e dos materiais que irão compor as camadas do pavimento.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo propor e descrever uma metodologia baseada no estudo do solo do subleito, que satisfaça aos critérios hidráulicos e mecânicos para o dimensionamento de pavimentos permeáveis em áreas com baixo volume de tráfego.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar o solo presente no local onde será implantando o pavimento permeável;
- Estabelecer correlações entre CBR e DCP para o solo em estudo;
- Dimensionar o pavimento de concreto permeável, para o estacionamento já existente, no Bloco 8 do Campus da Asa Norte do Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), de acordo com as exigências da NBR 16.416 (ABNT, 2015).

## **2 METODOLOGIA**

A metodologia utilizada foi embasada em normatizações brasileiras, internacionais e metodologias propostas por pesquisadores da área. Os ensaios e experimentos foram realizados *in situ*, no Laboratório de Solos do Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), e no Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB) da Universidade de Brasília (UnB). O enfoque da pesquisa baseia-se no estudo do subleito do pavimento, assim sendo, a metodologia utilizada para a realização desta pesquisa foi realizada em cinco etapas, detalhadas a seguir:

### *Etapa 1) Ensaios em campo*

Nesta primeira etapa foram realizados ensaios e procedimentos em campo para avaliar características de permeabilidade do subleito, inspeção do perfil estratigráfico do solo por meio de ensaios de sondagem e definição da massa específica aparente obtida pelo ensaio Frasco de Areia, além da coleta de amostras

de solo para ensaios de caracterização em laboratório, amostras indeformadas para ensaios de módulo de resiliência e a medição da resistência do solo.

#### *Etapa 2) Estudo das características do subleito*

Para avaliar as características e classificar o solo foram executados diversos ensaios de caracterização como granulometria, limite de liquidez e plasticidade, massa específica real, entre outros. Também foi determinado o módulo de resiliência do solo por meio de ensaios no equipamento triaxial de carga cíclica.

#### *Etapa 3) Ensaios de CBR e DCP em laboratório para correlações*

Nesta etapa da pesquisa foram realizados ensaios de DCP e CBR em laboratório para determinar uma equação que relacionasse os dois ensaios e definisse a resistência do solo a partir dos ensaios de DCP realizados em campo. Para atingir este objetivo os ensaios de CBR e DCP foram executados no mesmo corpo de prova para obter uma relação coerente entre os dois parâmetros.

#### *Etapa 4) Resultados e análises*

Neste ponto da pesquisa foram apresentados os resultados obtidos a partir da caracterização do subleito, correlações entre CBR e DCP e módulo de resiliência juntamente com suas análises.

#### *Etapa 5) Dimensionamento da estrutura do pavimento*

A etapa de dimensionamento consistiu em calcular a espessura do pavimento de acordo com a capacidade de suporte (dimensionamento mecânico) e coeficiente de infiltração (dimensionamento hidráulico) do subleito.

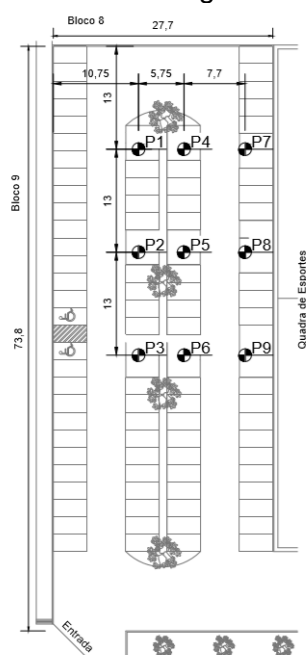
### **2.1 O Estacionamento e a Locação dos Ensaios**

Para a realização desta pesquisa foi escolhido o estacionamento localizado dentro do Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), no campus da Asa Norte, SEPN 707/907, em Brasília/DF. Atualmente o estacionamento é composto por uma camada

fina de brita nº 3 sobre solo compactado, possuindo formato retangular de 27,7m x 73,8m com área total de 2.045m<sup>2</sup>.

Para o desenvolvimento da pesquisa foi necessário estudar e caracterizar o solo do local. Sendo assim, para os ensaios *in situ*, como ensaios de permeabilidade, resistência do solo e coleta de amostras de solo para ensaios em laboratório, foi determinada a quantidade de 09 (nove) pontos de sondagem. A locação dos pontos de sondagem está representada na Figura 1. A distribuição da localização dos pontos de ensaio em campo foi determinada de acordo com o espaço liberado pela Supervisão de Campus da instituição.

**Figura 1** – Locação dos pontos de sondagem no estacionamento (P1 ao P9)



Fonte: Adaptado do Departamento de Arquitetura do UniCEUB.

## 2.2 Especificação das Placas

A caracterização das placas que irão compor o revestimento do pavimento foi realizada por Abreu e Coutinho (2017) por meio de ensaios de resistência à tração na flexão e permeabilidade em placas de concreto permeável. As placas de concreto permeável são de uma empresa local, facilitando o acesso ao produto. Quanto a sua dimensão, as placas de concreto permeável possuem 8 cm de espessura, com 40 cm de comprimento e largura (Figura 2).

**Figura 2** – Placa de concreto permeável para revestimento



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

De acordo com os requisitos da norma NBR 16.416 (ABNT, 2015), a placa deve conter resistência maior ou igual a 2,0 MPa. Sendo assim, com a resistência de 5,25 MPa, a placa em estudo atende perfeitamente às exigências normativas, uma vez que o resultado em todas as placas foi superior à resistência exigida.

Quanto à permeabilidade da placa, a norma NBR 16.416 (ABNT, 2015) descreve o procedimento do ensaio e determina que o coeficiente de permeabilidade deve ser maior que  $10^{-3}$  (m/s). De acordo com os resultados obtidos por Abreu e Coutinho (2017), o coeficiente de permeabilidade da placa de concreto permeável atende às condições de norma.

### **3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS**

#### **3.1 Perfil Estratigráfico do Solo**

Por meio das sondagens SPT e dos ensaios de caracterização foi possível elaborar o perfil estratigráfico do solo, na Figura 3, juntamente com os dados obtidos por meio do ensaio de SPT. As sondagens atingiram a profundidade de 8 metros e foram realizadas em quatro pontos do estacionamento, não coincidentes com os pontos de sondagem dos demais ensaios. Na profundidade de ensaios não foi encontrado nível d'água.

**Figura 3 – Perfil do solo com dados dos ensaios de SPT**

| Cotas (m) | Profundidade | Perfil Geológico                                     | Descrição do Material | Ensaio Penetrométrico (golpe/cm) |                   |                   |                   |
|-----------|--------------|--|-----------------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|           |              |  |                       | SP1                              | SP2               | SP3               | SP4               |
|           | 0,03         |  | Camada de Brita       |                                  |                   |                   |                   |
| -1,00     |              | Argila, pouco siltosa, pouco arenosa, vermelha, seca |                       | 2 2 2<br>15 15 15                | 4 7 8<br>15 15 15 | 1 2 2<br>15 15 15 | 1 2 2<br>15 15 15 |
| -2,00     |              |  | 1 3 3<br>15 15 15     | 1 2 2<br>15 15 15                | 1 1 1<br>15 15 15 | 1 1 1<br>15 15 15 |                   |
| -3,00     |              |  | 3 3 4<br>15 15 15     | 2 2 2<br>15 15 15                | 1 2 1<br>15 15 15 | 1 2 2<br>15 15 15 |                   |
| -4,00     |              |  | 2 3 4<br>15 15 15     | 2 3 3<br>15 15 15                | 3 3 4<br>15 15 15 | 2 2 2<br>15 15 15 |                   |
| -5,00     |              |  | 3 4 3<br>15 15 15     | 1 2 3<br>15 15 15                | 3 4 5<br>15 15 15 | 1 2 1<br>15 15 15 |                   |
| -6,00     | -5,90        | Areia, pouco argilosa, pouco siltosa, vermelha, seca | 3 3 2<br>15 15 15     | 2 1 2<br>15 15 15                | 4 4 5<br>15 15 15 | 3 3 4<br>15 15 15 |                   |
| -7,00     |              |  | 2 4 5<br>15 15 15     | 3 4 5<br>15 15 15                | 4 5 3<br>15 15 15 | 4 4 4<br>15 15 15 |                   |
| -8,00     |              |  |                       |                                  |                   |                   |                   |

Fonte: Acervo da Autora, 2019.

### 3.2 Caracterização do Solo do Subleito

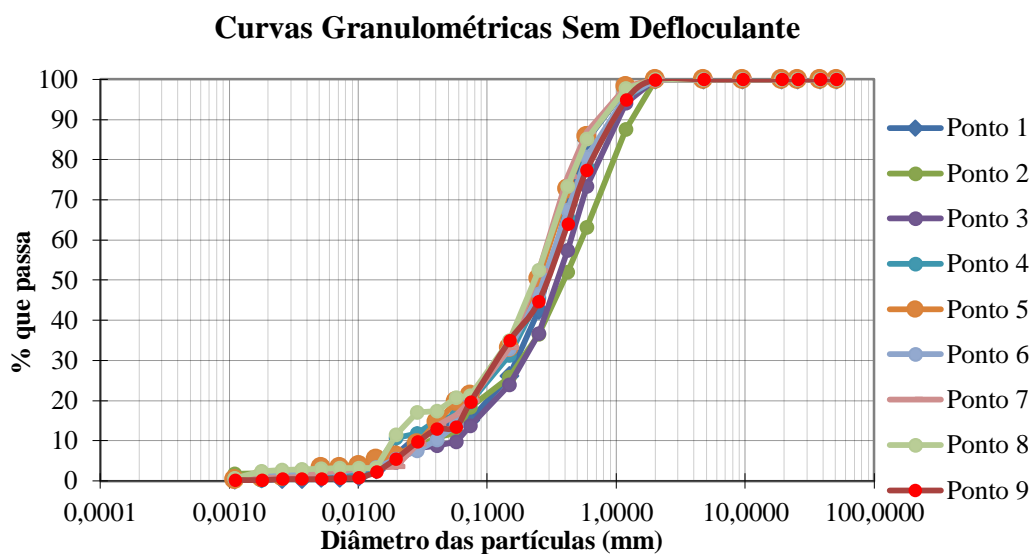
#### 3.2.1 Granulometria

Os resultados dos ensaios de granulometria estão representados nas curvas granulométricas apresentadas no Gráfico 1, sem defloculante, representando a composição real do solo. Nota-se grande diferença entre as amostras com e sem defloculante. Nas amostras sem defloculante a distribuição granulométrica é mais uniforme apresentando a maioria de suas partículas com tamanhos similares, tratando-se de uma areia fina.

Esta característica é muito comum em solos da região Centro Oeste do Brasil, que desagregam com o uso do defloculante.



**Gráfico 1 – Curvas granulométricas do solo do subleito sem defloculante**



### 3.2.2 Massa específica real – G<sub>s</sub>

Os valores de massa específica real de cada amostra de solo do local estudado estão apresentados na Tabela 1. Realizando uma média entre todos os valores tem-se que a massa específica real dos grãos do solo é de 2,72 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 1 – Resultados dos ensaios de massa específica real - G<sub>s</sub>**

|                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|
| <b>Ponto 1</b> | <b>Ponto 2</b> | <b>Ponto 3</b> |
| 2,70           | 2,64           | 2,61           |
| <b>Ponto 4</b> | <b>Ponto 5</b> | <b>Ponto 6</b> |
| 2,75           | 2,70           | 2,81           |
| <b>Ponto 7</b> | <b>Ponto 8</b> | <b>Ponto 9</b> |
| 2,75           | 2,67           | 2,81           |
| <b>Média</b>   |                | <b>2,72</b>    |

Valores em g/cm<sup>3</sup>

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.2.3 Limites de Atterberg

Os resultados dos limites de liquidez e plasticidade estão apresentados na Tabela 2 juntamente com os respectivos valores de índice de plasticidade. O índice de plasticidade é um parâmetro fundamental na classificação dos solos. De forma qualitativa, subtraindo o valor médio de LL com o valor médio de LP, tem-se que o valor médio do índice de plasticidade do solo é de 13,7, ou seja, o solo presente no subleito possui médio índice de plasticidade.

**Tabela 2 – Resultados Limites de Atterberg e Índice de plasticidade**

| Ponto        | LIMITES      |              | IP           |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
|              | LL (%)       | LP (%)       |              |
| P1           | 51,13        | 32,76        | 18,37        |
| P2           | 42,30        | 34,20        | 8,10         |
| P3           | 46,70        | 33,80        | 12,90        |
| P4           | 44,20        | 34,30        | 9,90         |
| P5           | 52,96        | 37,14        | 15,82        |
| P6           | 55,52        | 37,04        | 18,48        |
| P7           | 51,17        | 35,01        | 16,16        |
| P8           | 48,42        | 37,79        | 10,63        |
| P9           | 47,59        | 34,69        | 12,90        |
| <b>Média</b> | <b>48,89</b> | <b>35,19</b> | <b>13,70</b> |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.2.4 MCT – Método das Pastilhas

A partir dos ensaios de MCT pelo método das pastilhas obteve-se valores do coeficiente  $c'$ , contração do solo e umidade de moldagem para as amostras de solo, apresentados na Tabela 3. A partir dos valores médios é possível, de acordo com a metodologia MCT, classificar o solo como sendo LA-LA', ou seja, solo argiloso arenoso laterítico.

**Tabela 3 – Resultados dos ensaios de MCT – método das pastilhas**

| Ponto        | MCT         |                |              |
|--------------|-------------|----------------|--------------|
|              | $c'$        | Contração (mm) | W%           |
| P1           | 0,66        | 1,44           | 38,07        |
| P2           | 0,49        | 1,07           | 32,00        |
| P4           | 0,50        | 1,08           | 38,00        |
| P5           | 0,77        | 1,74           | 41,54        |
| P6           | 0,71        | 1,58           | 40,00        |
| P7           | 0,68        | 1,50           | 39,75        |
| P8           | 0,72        | 1,59           | 40,64        |
| P9           | 0,64        | 1,40           | 36,59        |
| <b>Média</b> | <b>0,65</b> | <b>1,43</b>    | <b>38,32</b> |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.2.5 Classificação SUCS e TRB

Para classificar o solo de acordo com o sistema TRB ou SUCS primeiramente é necessário calcular o índice de grupo (IG). Trata-se de um valor que varia de 0 a 20

que representa a plasticidade e a graduação dos grãos do solo. Os valores de índice de grupo juntamente com a classificação TRB e SUCS estão apresentados na Tabela 4. A partir dos valores de índice de grupo do solo avaliado sem o uso de defloculante, de acordo com a classificação TRB o solo pertence ao grupo A-2-7, ou seja, o solo se comporta como areia argilosa. Já de acordo com a classificação do SUCS o solo é caracterizado como SM-SC, ou melhor, areia siltosa argilosa.

**Tabela 4** – Valores de índice de grupo do solo ensaiado sem o uso de defloculante e classificações TRB e SUCS

| Ponto | Índice de Grupo IG | Classificação |       |
|-------|--------------------|---------------|-------|
|       |                    | TRB           | SUCS  |
|       | <b>SEM Defl.</b>   |               |       |
| P1    | 0,04               | A-2-7         | SM-SC |
| P2    | 0,60               | A-2-5         | SM-SC |
| P3    | 0,00               | A-2-7         | SM-SC |
| P4    | 0,84               | A-2-5         | SM-SC |
| P5    | 1,28               | A-2-7         | SM-SC |
| P6    | 1,08               | A-2-7         | SM-SC |
| P7    | 1,00               | A-2-7         | SM-SC |
| P8    | 1,24               | A-2-7         | SM-SC |
| P9    | 0,94               | A-2-7         | SM-SC |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.3 Frasco de Areia

Com o ensaio frasco de areia é possível determinar alguns dos índices físicos do solo de forma a representar suas condições naturais *in situ*. Os resultados dos ensaios de massa específica aparente ( $\rho$ ) e peso específico ( $\gamma$ ) estão apresentados na Tabela 5. A partir das médias é possível afirmar que a massa específica aparente seca do solo é de 1,36 g/cm<sup>3</sup>, a massa específica aparente úmida é de 1,69 g/cm<sup>3</sup> e o peso específico é de 13,38 kN/m<sup>3</sup>.

**Tabela 5** – Resultados dos ensaios de Frasco de Areia

| Ponto        | Frasco de Areia                  |                                  |                                 |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
|              | $\rho$ Seco (g/cm <sup>3</sup> ) | $\rho$ Úmi. (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma$ Seco kN/m <sup>3</sup> |
| P1           | 1,39                             | 1,72                             | 13,64                           |
| P2           | 1,27                             | 1,58                             | 12,46                           |
| P3           | 1,44                             | 1,79                             | 14,13                           |
| P4           | 1,35                             | 1,68                             | 13,25                           |
| P5           | 1,37                             | 1,7                              | 13,44                           |
| <b>Média</b> | <b>1,36</b>                      | <b>1,69</b>                      | <b>13,38</b>                    |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.4 Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) do subleito foi obtido por meio do ensaio de permeabilidade de Porchet e os resultados obtidos por meio deste ensaio estão apresentados na Tabela 6. Ao analisar os resultados nota-se que o coeficiente de permeabilidade é na grandeza de  $10^{-5}$ , sendo assim, o tipo de infiltração do pavimento é classificada como infiltração parcial e se comporta como areia, apresentando boa capacidade drenante.

**Tabela 6** – Resultados dos ensaios de permeabilidade de Porchet

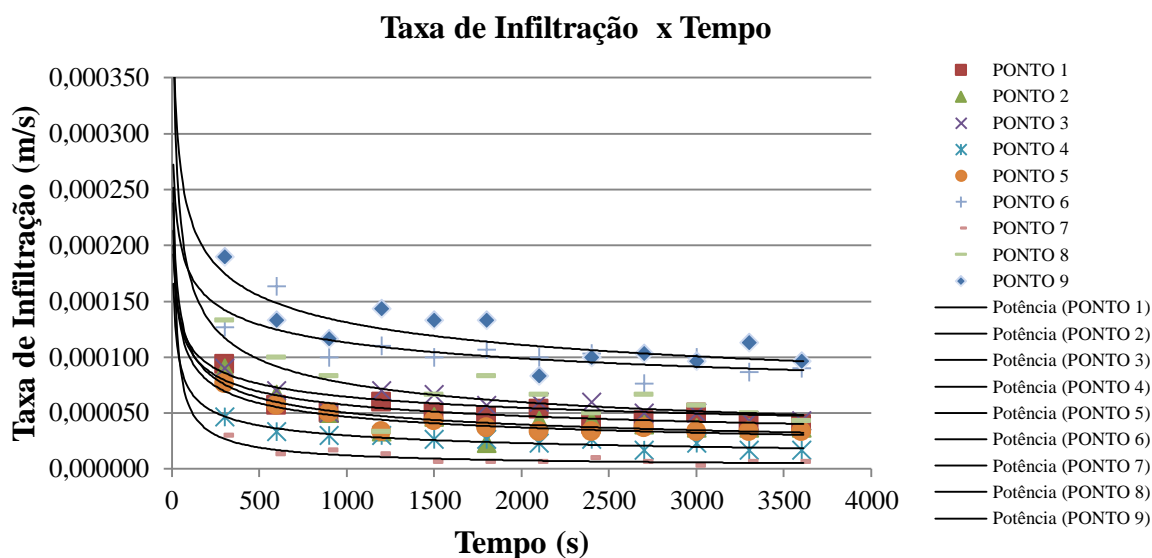
| Ponto             | Coeficiente de Permeabilidade ( $k$ , em m/s) |
|-------------------|---|
| 1                 | 4,20E-05                                      |
| 2                 | 3,60E-05                                      |
| 3                 | 6,90E-05                                      |
| 4                 | 5,30E-05                                      |
| 5                 | 7,70E-05                                      |
| 6                 | 3,80E-05                                      |
| 7                 | 5,00E-05                                      |
| 8                 | 9,50E-05                                      |
| 9                 | 3,20E-05                                      |
| <b>Média</b>      | <b>5,47E-05</b>                               |
| <b>Desv. Pad.</b> | <b>2,02E-05</b>                               |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.5 Taxa de Infiltração

A taxa de infiltração do subleito foi verificada por meio do ensaio de infiltração duplo anel. Para apresentar os resultados obtidos com este ensaio foi desenvolvido um gráfico relacionando a infiltração da água no solo com o tempo, representado no Gráfico 2. Os resultados obtidos com o ensaio de infiltração duplo anel estão apresentados na Tabela 7. Para a elaboração do dimensionamento hidráulico do pavimento permeável, será considerado o resultado obtido por meio da média dos valores de taxa de infiltração considerando um intervalo de confiança de 95% que é obtido por meio do valor médio, menos o desvio padrão que é multiplicado por 1,96. Sendo assim, o valor de taxa de infiltração é de  $5,98 \times 10^{-6}$  m/s.

**Gráfico 2 – Taxa de infiltração x tempo de todos os pontos estudados**



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

**Tabela 7 – Resultados dos ensaios de Infiltração Duplo Anel**

| Ponto            | Taxa de Infiltração (m/s) |
|------------------|---------------------------|
| 1                | 4,00E-05                  |
| 2                | 3,70E-05                  |
| 3                | 4,30E-05                  |
| 4                | 1,70E-05                  |
| 5                | 3,30E-05                  |
| 7                | 7,00E-06                  |
| 8                | 4,30E-05                  |
| <b>Média</b>     | <b>3,14E-05</b>           |
| <b>Des. Pad.</b> | <b>1,30E-05</b>           |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.6 Módulo de Resiliência

Os valores médios de Módulo de Resiliência estão apresentados na Tabela 8. Devido à dificuldade em extrair os corpos de prova do molde e a maior parte deles terem rompido durante a extração, foi possível realizar apenas 4 ensaios de módulo de resiliência.

**Tabela 8 – Resultados médios de Módulo de Resiliência do solo do subleito**

| Módulo de Resiliência Mr (MPa) |     |     |     |
|--------------------------------|-----|-----|-----|
| CP1                            | CP2 | CP3 | CP4 |

|                   |       |       |              |
|-------------------|-------|-------|--------------|
| 42,39             | 35,48 | 20,63 | 51,03        |
| <b>Média</b>      |       |       | <b>37,38</b> |
| <b>Desv. Pad.</b> |       |       | <b>11,13</b> |
| <b>C.V.</b>       |       |       | <b>30%</b>   |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

De acordo com as Instruções de Projeto de análises mecanicistas quanto à estrutura do pavimento, da Prefeitura de São Paulo (IP 08-2004), o módulo de resiliência de subleito encontra-se na faixa de variação de 25 a 125 MPa. Sendo assim, analisando os valores de módulo de resiliência, tem-se que estes estão coerentes, uma vez que são valores característicos para material de subleito.

Na Tabela 9 estão apresentados os valores das constantes de regressão de cada ensaio de módulo de resiliência, juntamente com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para cada modelo. A partir dos valores de  $R^2$  obtidos por meio dos modelos A, B, C e D, é possível perceber que o modelo D apresenta os melhores resultados para representar a variação do módulo de resiliência com as tensões atuantes no solo. Sendo assim, o modelo Universal de Witczak e Uzan é o que melhor representa o comportamento resiliente do solo do subleito em estudo a uma determinada tensão.

**Tabela 9 – Valores das constantes de regressão para os modelos apresentados**

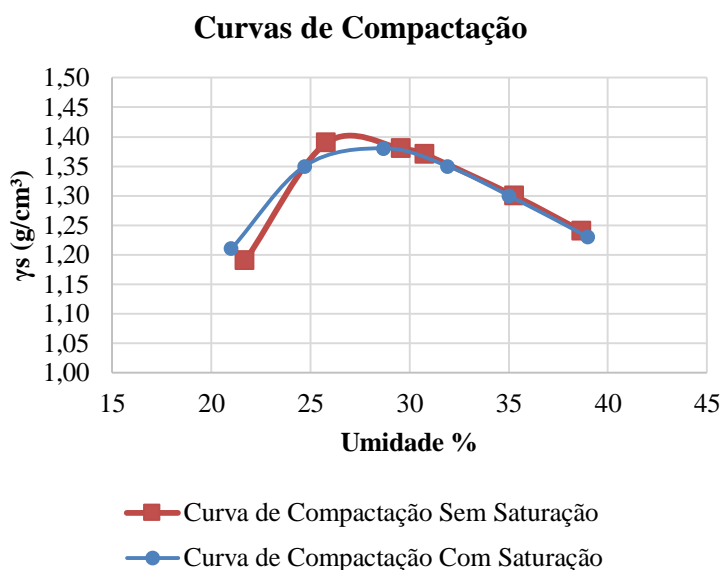
| Amostra | Modelos |        |       |         |        |       |        |        |         |       |       |        |         |       |
|---------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|--------|--------|---------|-------|-------|--------|---------|-------|
|         | A       |        |       | B       |        |       | C      |        |         |       | D     |        |         |       |
|         | $k1$    | $k2$   | $R^2$ | $k1$    | $k2$   | $R^2$ | $k1$   | $k2$   | $k3$    | $R^2$ | $k1$  | $k2$   | $k3$    | $R^2$ |
| CP1     | 23,433  | -0,157 | 0,43  | 40,675  | -0,007 | 0     | 20,478 | 0,165  | -0,033  | 0,45  | 0,066 | -0,257 | 455,79  | 0,44  |
| CP2     | 6,66    | -0,458 | 0,74  | 55,083  | 0,148  | 0,09  | 6,568  | -0,459 | -0,003  | 0,74  | 0,001 | -0,827 | 1257,39 | 0,82  |
| CP3     | 9,894   | -0,195 | 0,38  | 23,222  | 0,039  | 0,02  | 11,759 | -0,207 | 1437,93 | 0,44  | 0,012 | -0,373 | 1437,93 | 0,65  |
| CP4     | 15,672  | -0,314 | 0,43  | 102,533 | 0,216  | 0,32  | 32,789 | -0,314 | 0,216   | 0,75  | 0,009 | -0,522 | 2478,54 | 0,88  |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.7 Correlação entre CBR e DCP

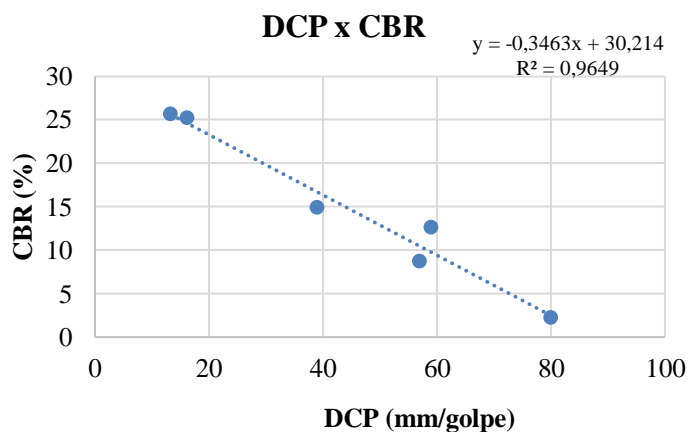
Para estabelecer as correlações entre CBR e DCP foram compactados no total 12 corpos de prova (CPs), onde 6 não foram submersos na água e os outros 6 foram realizados de acordo com os procedimentos padrão. As duas curvas de compactação estão representadas no Gráfico 3.

**Gráfico 3 – Curvas de compactação**



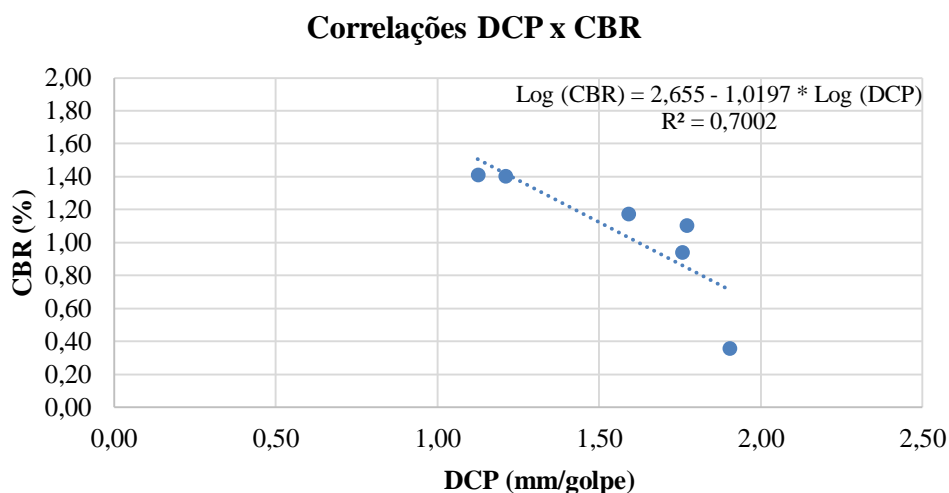
Analisando o Gráfico 3 acima, pode-se notar que alguns CPs foram compactados muito próximos ao limite de liquidez do solo, ficando muito moles. Devido à consistência e pelo corpo de prova possuir em média apenas 12 cm de altura optou-se por não realizar o ensaio de DCP nestes CPs, pois o DCP iria facilmente penetrar a seção do CP, podendo danificar a ponta do equipamento. Sendo assim, os ensaios de CBR e DCP em laboratório foram realizados em 8 corpos de prova, onde 2 deles foram retirados dos cálculos por seus valores estarem discrepantes. O Gráfico 4 apresenta as correlações lineares obtidas por meio dos ensaios de CBR e DCP.

**Gráfico 4 – Valores de DCP e CBR correlacionados**



Para estabelecer relações com os dados de outros autores e definir a equação que correlacionam os dados de DCP e CBR do solo estudado, os valores obtidos por meio dos ensaios foram convertidos para base logarítmica. O Gráfico 5 apresenta a correlação que representa os ensaios de DCP e CBR do solo estudado; por meio dele é possível obter a Equação 1.

**Gráfico 5** – Valores de DCP e CBR correlacionados em base logarítmica



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

$$\text{Log (CBR)} = 2,655 - 1,0197 * \text{Log (DCP)} \quad (\text{eq. 1})$$

### 3.8 Ensaios de DCP em Campo

Os resultados obtidos por meio do ensaio de DCP realizados em campo estão apresentados na Tabela 10 e representados no Gráfico 6. Os pontos 1 e 5 foram removidos por não representarem bem a amostra de dados.

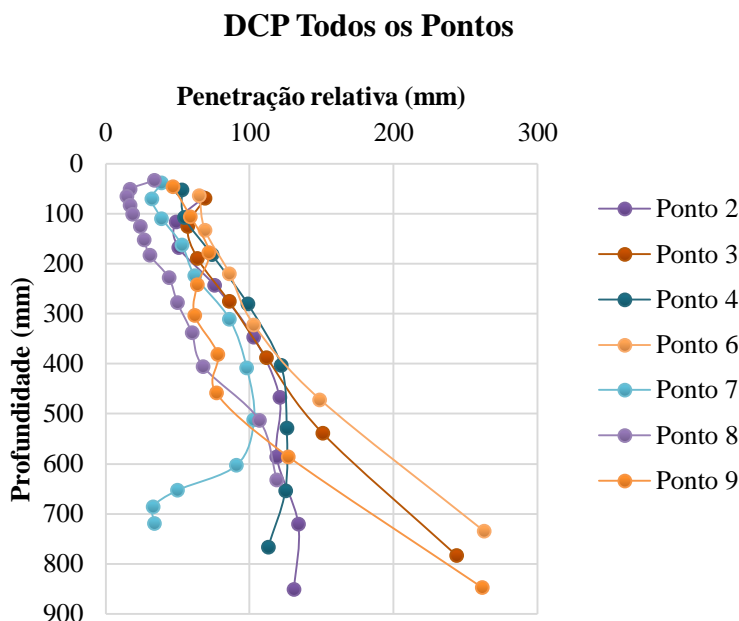
**Tabela 10** – Resultados de DCP e umidade do solo na hora do ensaio

| Ponto             | DCP (mm/golpe) | Umidade (%)  |
|-------------------|----------------|--------------|
| P02               | 88,42          | 35,00        |
| P03               | 83,86          | 37,00        |
| P04               | 90,70          | 32,00        |
| P06               | 83,68          | 38,00        |
| P07               | 68,47          | 36,00        |
| P08               | 49,60          | 35,00        |
| P09               | 68,66          | 33,00        |
| <b>Média</b>      | <b>76,20</b>   | <b>35,14</b> |
| <b>Desv. Pad.</b> | <b>13,62</b>   | <b>1,96</b>  |
| <b>C.V</b>        | <b>17,9%</b>   | <b>5,6%</b>  |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.



**Gráfico 6 –** Relação entre profundidade e penetração relativa dos ensaios de DCP em campo



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Com os valores de DCP em campo foi possível determinar os valores de CBR de acordo com a Equação 1 que correlaciona o CBR com o DCP para o solo em estudo. A Tabela 11 apresenta os valores de CBR obtidos por meio da Equação 1.

**Tabela 11 –** Valores de CBR obtidos por meio da equação de correlação CBR x DCP

| Ponto                | P02         | P03  | P04  | P06  | P07  | P08  | P09  |
|----------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|
| CBR (%)              | 4,68        | 4,94 | 4,56 | 4,95 | 6,07 | 8,44 | 6,05 |
| <b>CBR Médio (%)</b> | <b>5,67</b> |      |      |      |      |      |      |
| <b>Desv. Pad.</b>    | <b>1,27</b> |      |      |      |      |      |      |

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

A partir dos valores de CBR determinados por meio da Equação 1, é possível afirmar que o valor de CBR do solo do subleito é em torno de 5%.

## 4 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

### 4.1 Dimensionamento Hidráulico

O dimensionamento hidráulico deve ser feito de acordo com as recomendações da NBR 16.146 (ABNT, 2015). Refere-se ao cálculo da altura da camada de base e/ou

sub-base considerando apenas sua função de reservatório de água, questão esta que não exclui o dimensionamento mecânico. Ao realizar os dois dimensionamentos, hidráulico e mecânico, opta-se por adotar o maior dos valores, pois atenderá aos dois critérios.

Portanto, para o dimensionamento hidráulico tem-se 8 cm de revestimento (placa de concreto permeável), 2 cm de camada de assentamento e 10 cm de material granular para a camada de base, totalizando em 20 centímetros.

A partir das características de permeabilidade do subleito de acordo com a NBR 16.416 (ABNT, 2015), o tipo de infiltração do pavimento é dado como infiltração parcial, havendo necessidade de utilização de drenos no pavimento para auxiliar no escoamento da água. Porém, com base no dimensionamento hidráulico, acredita-se que o uso de drenos é dispensável, uma vez que a espessura da camada de base (reservatório temporário) foi alterada para 10 centímetros por se tratar de uma espessura mínima requerida pelo Manual de Pavimentação do DNIT (BRASIL, 2006).

#### **4.2 Dimensionamento Mecânico**

O dimensionamento mecânico foi realizado conforme o Método da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) descrita por Senço (2007). Primeiramente deve-se classificar o tipo de tráfego, que no caso do pavimento em área de estacionamento de universidade utilizado apenas por professores, é dado como Tráfego Muito Leve (TML), este corresponde a até três veículos comerciais por dia. Os veículos comerciais são representados por ônibus, caminhões e carros de grande porte. A espessura do pavimento pelo método PMSP é obtido por meio do valor de CBR do subleito, no caso deste trabalho, 5%. Com base no Ábaco de Dimensionamento tem-se que a espessura básica do pavimento é de 48 centímetros.

Deste modo a espessura total do pavimento é de 46 cm, sendo composto por 36 cm de material granular (base), 2 cm de camada de assentamento e 8 cm de placa de concreto permeável (revestimento).

Existe também um método de dimensionamento mecânico mais econômico, também da PMSP, com apenas algumas alterações em relação a tráfegos leves e muito leves. O dimensionamento neste caso é obtido por meio do ábaco de dimensionamento.

Com base no ábaco e no valor de CBR do subleito tem-se que a espessura total do pavimento é de 33,5 cm. Desta vez, com a intenção de realizar um dimensionamento mais econômico, após o emprego das equivalências estruturais por camada, a espessura total do pavimento é de 32 cm, sendo composto por 22 cm de material granular (base), 2 cm de camada de assentamento e 8 cm de placa de concreto permeável (revestimento).

Portanto, com base nos dimensionamentos, tem-se que a espessura ideal do pavimento é de 32 centímetros, pois desta forma o pavimento irá atender tanto aos requisitos solicitados pelo dimensionamento hidráulico quanto aos requisitos do dimensionamento mecânico.

## **5 CONCLUSÕES**

A presente pesquisa direcionou-se em estudos para implementação de um pavimento permeável com base nas propriedades do subleito do pavimento como proposta metodológica, que se mostrou eficiente para dimensionar o pavimento permeável. Sobre a caracterização do solo, conclui-se que o seu estudo é de grande importância em obras de pavimentação, pois possibilita conhecimentos sobre as propriedades do solo. O fato de o solo se comportar como areia fina colabora para as propriedades de infiltração exigidas em um pavimento permeável onde o solo deve permitir a passagem da água por meio de seus poros.

Quanto ao módulo de resiliência o solo, em condições naturais, apresentou características próprias de material de subleito, e é bem representado pelo modelo Universal de Witczak e Uzan. As correlações entre CBR e DCP apresentam estimativas confiáveis que permitem a correlação, desde que utilizadas em solos que apresentem características similares às do solo em estudo.

O método utilizado no dimensionamento mecânico do pavimento não é específico para estacionamento, sendo uma adaptação de dimensionamento para vias com tráfego muito leve. De acordo com os cálculos e análises realizadas, o pavimento pode ser executado de acordo com os parâmetros obtidos por meio do dimensionamento mecânico pelo método PMSP, que visa uma estrutura mais econômica, totalizando em 32 centímetros, composto por 8 centímetros de revestimento, 2 centímetros de camada de assentamento e 22 centímetros de material granular na camada de base. Contudo, vale ressaltar que este dimensionamento mecânico trata-se de um dimensionamento preliminar, baseado em métodos empíricos.

Por fim, é importante comentar que o pavimento permeável ainda é muito pouco utilizado no Brasil, por isso o estudo e a implementação desse tipo de estrutura em locais com baixo tráfego é um ótimo ponto de partida para monitorar e realizar melhoras quanto ao seu dimensionamento.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 16.416: *Pavimentos permeáveis de concreto: requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro, 2015.

ABREU, L.S.L.G.; COUTINHO, L.F.M. *Metodologia para Implantação de Pavimentos Permeáveis em Brasília: um Estudo de Caso*. 2017. 97f. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasília, 2017.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Manual de pavimentação*, Brasília: 2006.

MARCHIONI, Mariana; SILVA, Cláudio O. *Pavimento intertravado permeável: melhores práticas*. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). São Paulo, 2011.

SENÇO, Wlastermiller de. *Manual de técnicas de pavimentação*. 2. ed. São Paulo: PINI, 2007.