



**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UNICEUB
PROGRAMA DE MESTRADO EM ARQUITETURA E
URBANISMO – CIDADE E HABITAÇÃO**

LUANA MOREIRA

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DO SUBLEITO PARA
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL – ESTUDO DE
CASO**

BRASÍLIA-DF

2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

LUANA MOREIRA

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DO SUBLEITO PARA
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL – ESTUDO
DE CASO**

Dissertação apresentada ao Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração em Cidade e Habitação, para a obtenção do título de Mestre.

BRASÍLIA

2019

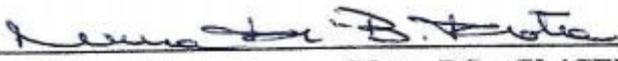
LUANA MOREIRA

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DO SUBLEITO PARA
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL – ESTUDO
DE CASO**

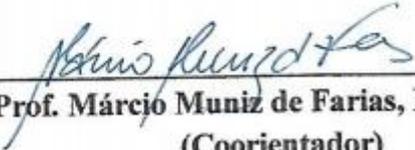
Dissertação apresentada ao Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração em Cidade e Habitação, para a obtenção do título de Mestre.

BRASÍLIA, 26 DE FEVEREIRO DE 2019

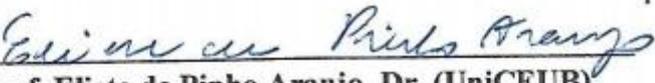
BANCA EXAMINADORA



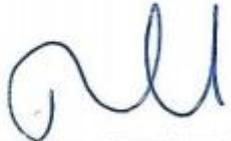
Prof. Neusa Maria Bezerra Mota, DSc. (UniCEUB)
(Orientadora)



Prof. Márcio Muniz de Farias, PhD. (UnB)
(Coorientador)



Prof. Eliete de Pinho Araujo, Dr. (UniCEUB)
(Examinadora Interna)



Prof. Lia Lorena Pimentel, Dr. (PuC-Campinas)
(Examinadora Externa)

FICHA CATALOGRÁFICA

MOREIRA LUANA

Metodologia de análise do subleito para dimensionamento de pavimento permeável – Estudo de Caso. Brasília, 2019.

169f.

Dissertação apresentada ao Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração em Cidade e Habitação, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof. Neusa Maria Bezerra Mota

1. Drenagem Urbana 2. escoamento superficial 3. Pavimento Permeável 4. Caracterização de subleito.

“ Portanto, quem ouve estas minhas palavras e as pratica é como um homem prudente que construiu a sua casa sobre a rocha. Caiu a chuva, transbordaram os rios, sopraram os ventos e deram contra aquela casa, e ela não caiu, porque tinha seus alicerces na rocha. ”

Mateus 7:24,25

RESUMO

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 em centros urbanos estão diminuindo gradualmente e o terreno urbano está ficando cada vez mais impermeável. Uma das soluções empregadas pelos órgãos públicos para solucionar este problema está na instalação de sistemas de drenagem, usualmente com a execução sarjetas nos lados adjacentes das rodovias, que têm a função de conduzir a água para áreas permeáveis. Contudo, esta prática, muitas vezes, faz com que a enchente se direcione para outro lugar, mudando apenas a localização do problema. Nos dias atuais, para evitar mais desastres causados pelo escoamento superficial das águas pluviais, é indispensável a busca por alternativas que sejam sustentáveis e que otimizem o espaço urbano das cidades. Assim sendo, a presente pesquisa sugere a construção de pavimentos permeáveis como solução para tais 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.

ABSTRACT

Some natural disasters such as climate change and floods are the cause and the reflexes of the great urbanization and unbridled occupation of cities. Due to the active occupancy, the infiltration areas or permeable areas in urban centers are gradually decreasing and the soil is becoming impermeable. In order to avoid disasters caused by the superficial drainage of rainwater, it is essential to search for alternatives that are sustainable and that optimize the urban space of cities. The present research suggests the construction of permeable pavements as a solution to such urban problems caused by the superficial drainage of rainwater around the buildings, besides proposing a methodology based on the study of the subgrade to size the permeable pavement for a parking area. For this, studies of soil characterization, permeability, soil resistance through the Dynamic Cone Penetration Test (DCP) and evaluation of the resilience module were performed and evaluated. The permeable pavement must meet the demands of mechanical loads of vehicle and pedestrian bearing, and at the same time must allow the infiltration of the water in the soil, avoiding the superficial flow, without causing damage to its structure. This type of pavement is ideal for running on parking lots and sidewalks, where usually the load generated by the vehicles and people circulation is not high. At the end of the research it was possible to obtain the total thickness of the pavement, meeting both mechanical and hydraulic criteria.

Keywords: Urban Drainage. Surface Runoff. Permeable Pavement. Characterization of the Subgrade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – População no Estado de São Paulo	6
Figura 2 – Gráfico Ilustrativo Sobre Temperatura no Ambiente Urbano	7
Figura 3 – Hidrograma de um evento de precipitação antes e depois da urbanização	13
Figura 4 – Percentuais de Infiltração de Águas Pluviais.....	17
Figura 5 – Comparativo de taxas de infiltração no solo	18
Figura 6 – Demonstração da eficiência de um pavimento permeável em estacionamento.....	20
Figura 7 – Seção tipo de pavimento permeável.....	21
Figura 8 – Sistema de pavimento permeável infiltração total	29
Figura 9 – Sistema de pavimento permeável infiltração parcial	29
Figura 10 – Sistema de pavimento permeável sem infiltração.....	30
Figura 11 – Mapa de Brasília apontando a localização do UniCEUB.....	42
Figura 12 – Estacionamento do Bloco 8 do UniCEUB – Asa Norte.....	43
Figura 13 – Planta baixa do UniCEUB – Asa Norte com destaque da área do estacionamento	43
Figura 14 – Localização dos pontos de sondagem no estacionamento (P1 ao P9).....	44
Figura 15 – Localização dos pontos de Sondagem SPT.....	45
Figura 16 – Infiltrômetros de cilindros concêntricos.....	47
Figura 17 – Cravação dos cilindros no solo em condições naturais	48

Figura 18 – Adição de água dentro dos cilindros	48
Figura 19 – Coleta de dados – Leitura do nível da água.....	49
Figura 20 – Infiltrômetro de cilindro escavado – Porchet.....	49
Figura 21 – Furo cilíndrico com 30 cm de diametro e 70 cm de profundidade para ensaio de permeabilidade de Porchet.....	50
Figura 22 – Ensaio de permeabilidade de Porchet em andamento	51
Figura 23 – Esquema da estrutura do equipamento DCP	52
Figura 24 – Execução do ensaio de DCP no campo	53
Figura 25 – Disposição dos equipamentos do ensaio Frasco de Areia	53
Figura 26 – Ensaio frasco de areia.....	54
Figura 27 – Cravação do cilindro metálico no solo para coleta de amostra indeformada	55
Figura 28 – Remoção do solo nas laterais do cilindro	55
Figura 29 – Execução de ensaios em campo	57
Figura 30 – Preparação do solo para ensaios de caracterização – Destorroamento e peneiramento do solo	60
Figura 31 – Dispersor de solos	61
Figura 32 – Sedimentação de 03 amostras de solo (Com Defloculante)	61
Figura 33 – Jogo de peneiras	62
Figura 34 – Material retido.....	63

Figura 35 – Sedimentação em duas amostras de solo (Sem Defloculante).....	63
Figura 36 – Dispersores de solo utilizados para agitar as amostras	64
Figura 37 – Aplicação de vácuo nos balões volumétricos contendo amostra de solo	65
Figura 38 – Balões volumétricos após resfriamento.....	65
Figura 39 – Equipamentos utilizados no ensaio de Limite de Liquidez	66
Figura 40 – Equipamento de Casa Grande com solo.....	67
Figura 41 – Ranhura.....	67
Figura 42 – Situação da massa de solo antes e depois dos golpes.....	68
Figura 43 – Formação do cilindro para ensaio de limite de plasticidade do solo.....	68
Figura 44 – Amostras retiradas dos ensaio de limite de liquidez e plasticidade para verificação do teor de umidade do solo.....	69
Figura 45 – Classificação do método das pastilhas	69
Figura 46 – Amostras de solo moldadas para ensaio de MCT Método das Pastilhas	70
Figura 47 – Pastilhas de solo colocadas	71
Figura 48 – Teste de penetração nas pastilhas.....	71
Figura 49 – Equipamento triaxial de carga repetida	72
Figura 50 – Corpo de prova com membrana plástica na base do triaxial	73
Figura 51 – Equipamento Triaxial pronto para iniciar o ensaio	74
Figura 52 – Equipamentos utilizados no ensaio de compactação	75

Figura 53 – Corpos de prova imersos na água	76
Figura 54 – Prensa utilizada para penetração	76
Figura 55 – Superfície utilizada para penetração CBR.....	77
Figura 56 – Superfície utilizada para o DCP.....	77
Figura 57 – Base com disco espaçador com camada de borracha.....	78
Figura 58 – Cilindro encaixado na base pronto para ensaio de DCP	78
Figura 59 – Placa de concreto permeável para revestimento	79
Figura 60 – Perfil do solo com dados dos ensaios de SPT.....	82
Figura 61 – Parâmetros de projeto para o dimensionamento da camada de base	100
Figura 62 – Ábaco para dimensionamento de pavimento	102
Figura 63 – Ábaco para dimensionamento (econômico)	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 (a) – Sistemas Típicos de Drenagem Alternativa.....	15
Quadro 1 (b) – Sistemas Típicos de Drenagem Alternativa.....	Erro! Indicador não definido.
Quadro 2 – Benefícios e inconveniências do pavimento permeável	22
Quadro 3 – Tipos de revestimentos típicos do pavimento permeável	24
Quadro 4 – Classificação dos solos - TRB.....	58
Quadro 5 – Classificação dos solos - SUCS.....	59
Quadro 6 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 1	127
Quadro 7 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 2	127
Quadro 8 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 3	127
Quadro 9 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 4	128
Quadro 10 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 5	128
Quadro 11 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 6	128
Quadro 12 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 7	129
Quadro 13 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 8	129
Quadro 14 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 9	129
Quadro 15 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 1	142
Quadro 16 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 2.....	143
Quadro 17 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 3.....	144

Quadro 18 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 4.....	145
Quadro 19 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 5.....	146
Quadro 20 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 6.....	147
Quadro 21 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 7.....	148
Quadro 22 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 8.....	149
Quadro 23 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 9.....	150

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Etapas seguidas para desenvolvimento da pesquisa.....	41
Fluxograma 2 – Etapas seguidas nos procedimentos realizados em campo.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação para o material de assentamento	26
Tabela 2 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de assentamento	26
Tabela 3 – Especificação para o material de sub-base e/ou base	27
Tabela 4 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de sub-base e/ou base	27
Tabela 5 – Tipo de infiltração do pavimento em função das condições locais	28
Tabela 6 – Características de permeabilidade e drenagem dos solos	31
Tabela 7 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável	33
Tabela 8 – Correlações DCP x CBR sugeridas pela ASTM D6951 (2018).....	35
Tabela 9 – Correlações DCP x CBR elaboradas por Carvalho (2005) para solos saprolíticos	36
Tabela 10 – Correlações DCP x CBR elaboradas por Lima (2000) para solos lateríticos	37
Tabela 11 – Modelos para representação da variação do Módulo de Resiliência com as tensões atuantes no solo	38
Tabela 12 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade	46
Tabela 13 – Sequências de tensões para determinação do Módulo de Resiliência para solo do subleito	74
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão	80
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade da placa	80
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de massa específica real - G _s	84

Tabela 17 – Resultados Limites de Atterberg e Índice de plasticidade	85
Tabela 18 – Classificação qualitativa do índice de plasticidade dos solos	85
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de MCT – método das pastilhas	86
Tabela 20 – Valores de índice de grupo do solo ensaiado com uso de defloculante e classificações TRB e SUCS	87
Tabela 21 – Valores de índice de grupo do solo ensaiado sem o uso de defloculante e classificações TRB e SUCS	88
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de Frasco de Areia	89
Tabela 23 – Resultados dos ensaios de permeabilidade de Porchet	89
Tabela 24 – Resultados dos ensaios de Infiltração Duplo Anel	91
Tabela 25 – Resultados médios de Módulo de Resiliência do solo do subleito	91
Tabela 26 – Valores das constantes de regressão para os modelos apresentados	92
Tabela 27 – Resultados de DCP e umidade do solo na hora do ensaio	96
Tabela 28 – Valores de CBR obtidos por meio da equação de correlação CBR x DCP	97
Tabela 29 – Valores de CBR de acordo com o Índice de grupo	98
Tabela 30 – Valores dos coeficientes de equivalência estrutural - K	103
Tabela 31 – Resultados dos dimensionamentos Hidráulico e Mecânico	104
Tabela 32 – Material passante no ensaio de Granulometria Com Defloculante	124
Tabela 33 – Material passante no ensaio de Granulometria Sem Defloculante	125

Tabela 34 – Dados obtidos por meio do ensaio de massa específica real - G _s	126
Tabela 35 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 1	130
Tabela 36 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 2	131
Tabela 37 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 3	132
Tabela 38 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 4	133
Tabela 39 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 5	134
Tabela 40 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 6	135
Tabela 41 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 7	136
Tabela 42 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 8	137
Tabela 43 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 9	138
Tabela 44 – Valores de Módulo de Resiliência	139
Tabela 45 – Valores da umidade e densidade dos corpos de prova compactados.....	140
Tabela 46 – Resultados dos ensaios de CBR (I.S.C.)	140
Tabela 47 – Dados e resultados ensaio de DCP nos CPs sem saturação	141
Tabela 48 – Dados e resultados ensaio de DCP nos CPs com saturação de 96h	141

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Correlações DCP x CBR para todos os pontos analisados por Carvalho (2005)..	35
Gráfico 2 – Correlações DCP x CBR para todos os pontos analisados por Lima (2000).....	36
Gráfico 3 – Curvas granulométricas do solo do subleito com defloculante.....	83
Gráfico 4 – Curvas granulométricas do solo do subleito sem defloculante	84
Gráfico 5 – Taxa de infiltração x tempo de todos os pontos estudados.....	90
Gráfico 6 – Curvas de compactação	93
Gráfico 7 – Valores de DCP e CBR correlacionados	94
Gráfico 8 – Valores de DCP e CBR correlacionados em base logarítmica	94
Gráfico 9 – Comparação entre dados das correlações CBR x DCP de Lima (2000) e Moreira (2019).....	95
Gráfico 10 – Comparação entre dados das correlações CBR x DCP de Carvalho (2005) e Moreira (2019).....	95
Gráfico 11 – Relação entre profundidade e penetração relativa dos ensaios de DCP em campo	97
Gráfico 12 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 1	130
Gráfico 13 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 2	131
Gráfico 14 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 3	132
Gráfico 15 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 4	133
Gráfico 16 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 5	134

Gráfico 17 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 6	135
Gráfico 18 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 7	136
Gráfico 19 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 8	137
Gráfico 20 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 9	138
Gráfico 21 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 1.....	142
Gráfico 22 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 2.....	143
Gráfico 23 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 3.....	144
Gráfico 24 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 4.....	145
Gráfico 25 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 5.....	146
Gráfico 26 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 6.....	147
Gráfico 27 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 7.....	148
Gráfico 28 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 8.....	149
Gráfico 29 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 9.....	150

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE FLUXOGRAMAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE GRÁFICOS	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Problema da Pesquisa	3
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Hipótese.....	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo Geral	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5 Estrutura da Dissertação.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Planejamento Urbano	5
2.2 Drenagem Urbana.....	8
2.2.1 Sistemas de Drenagem.....	13
2.3 Infiltração	16
2.4 Pavimento Permeável.....	19

2.4.1	Revestimento do Pavimento Permeável.....	22
2.4.2	Camada de Assentamento	26
2.4.3	Camada de Base.....	26
2.4.4	Subleito	27
2.4.5	Sistemas de Infiltração do Pavimento Permeável.....	28
2.4.6	Permeabilidade	30
2.5	Requisitos Para o Dimensionamento do Pavimento Permeável.....	31
2.5.1	Dimensionamento Hidráulico.....	32
2.5.2	Dimensionamento Mecânico	32
3	METODOLOGIA	40
3.1	O Estacionamento e a Locação dos Ensaios	42
3.2	Subleito - Ensaios e Procedimentos Realizados	44
3.2.1	Ensaios e Procedimentos Realizados em Campo	44
3.2.2	Logística dos Procedimentos e Ensaios Realizados <i>In Situ</i>	56
3.2.3	Caracterização do Solo do Subleito em Laboratório	58
3.3	Módulo de Resiliência do solo	72
3.4	Correlação Entre CBR e DCP	75
3.5	Camada de Base e Assentamento	79
3.6	Especificação das Placas	79
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	81
4.1	Perfil Estratigráfico do Solo	81

4.2	Caracterização do Solo do Subleito	82
4.2.1	Granulometria.....	82
4.2.2	Massa específica real – Gs	84
4.2.3	Limites de Atterberg	85
4.2.4	MCT – Método das Pastilhas	86
4.2.5	Classificação SUCS e TRB	86
4.3	Frasco de Areia.....	88
4.4	Coeficiente de permeabilidade	89
4.5	Taxa de Infiltração	90
4.6	Módulo de Resiliência	91
4.7	Correlação entre CBR e DCP	92
4.8	Ensaio de DCP em Campo.....	96
5	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO	99
5.1	Dimensionamento Hidráulico.....	99
5.2	Dimensionamento Mecânico	101
6	CONCLUSÕES	106
6.1	Sugestões Para Novas Pesquisas	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
	APÊNDICE A – Planta Baixa do UniCEUB – Asa Norte com destaque da área do estacionamento.....	117

APÊNDICE B – Locação dos Pontos de Sondagem no Estacionamento	118
APÊNDICE C – Locação dos Pontos de Sondagem SPT no Estacionamento	119
APÊNDICE D – Tabela para Coleta de Dados do Ensaio de Duplo Anel	120
APÊNDICE E – Tabela para Coleta de Dados do Ensaio de Permeabilidade - Porchet	121
APÊNDICE F – Tabela para Coleta de Dados do Ensaio de DCP.....	122
APÊNDICE G – Checklist de Equipamentos e Materiais – Utilizados na execução de procedimentos e ensaios <i>in situ</i>	123
APÊNDICE H – Resultados dos Ensaios de Granulometria.....	124
APÊNDICE I – Resultados dos Ensaios de Massa Específica Real.....	126
APÊNDICE J – Dados Obtidos com o Ensaio de Permeabilidade de Porchet	127
APÊNDICE K – Dados Obtidos com o Ensaio de Infiltração Duplo Anel	130
APÊNDICE L – Dados e Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.....	139
APÊNDICE M – Resultados e Dados dos ensaios para Correlações entre CBR e DCP	140
APÊNDICE N – Dados Obtidos com o Ensaio de Penetração Dinâmica de Cone (DCP) Executados em Campo.....	142

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.

Especificamente para estacionamentos, a execução deste tipo de pavimento seria de grande aproveitamento quanto ao seu aspecto funcional. Por serem instalados geralmente em extensas áreas abertas, os estacionamentos recebem uma quantidade significativa de águas pluviais, colaborando com a formação de lâminas superficiais de água. Contudo, uma vez executado com pavimento permeável, o estacionamento adquire outra função além de ser um local de permanência de veículos. Serviria como área de infiltração ou mesmo de

armazenamento, evitando a formação de lâminas de água na superfície, e conseqüentemente, diminuindo escoamento superficial sem que isto interfira em sua estrutura ou desempenho. Além do mais, o pavimento permeável também possui a capacidade de armazenar a água, funcionando como um grande reservatório, enquanto a infiltração ocorre.

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 (2011a), os pavimentos permeáveis são definidos como aqueles que possuem espaços livres na sua estrutura onde a água pode atravessar.

Esta dissertação 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, serão utilizadas metodologias para verificar a capacidade de infiltração do solo, a resistência do solo e ensaios de caracterização nos materiais que irão compor as 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 a construção de pavimentos permeáveis na região central de Brasília/DF.

1.1 Problema da Pesquisa

Com o crescimento da população, a ocupação e uso do solo nos centros urbanos têm tornado estas áreas cada vez mais densas, provocando congestionamento nas cidades, e como consequência o agravamento do problema da drenagem urbana. A consequência da ineficiência do sistema de drenagem resulta em inundações, alagamentos e problemas de erosão do solo. Diante deste contexto, 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).

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação estará dividida em seis capítulos. No capítulo um é introduzido o tema da pesquisa, abrangendo o problema da pesquisa, a justificativa, hipótese e por fim seus objetivos.

No capítulo dois é descrita a revisão da literatura sobre o tema proposto abrangendo conceitos de drenagem urbana, sistemas de drenagem, pavimento permeável e questões de dimensionamento.

No capítulo três são apresentados os materiais e a metodologia que foram empregados na realização deste estudo. E no capítulo quatro são apresentados os resultados juntamente com as análises.

O capítulo cinco contém o dimensionamento hidráulico e mecânico do pavimento permeável, especificando a dimensão de suas camadas. Por fim, no capítulo seis estão as conclusões obtidas no término da pesquisa juntamente com as sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas informações pertinentes ao tema proposto com o intuito de fundamentar a pesquisa. Sendo assim, a revisão bibliográfica discorrerá sobre planejamento e drenagem urbana, conceito de infiltração, e por fim, discorrerá sobre o pavimento permeável abrangendo suas características e questões de dimensionamento.

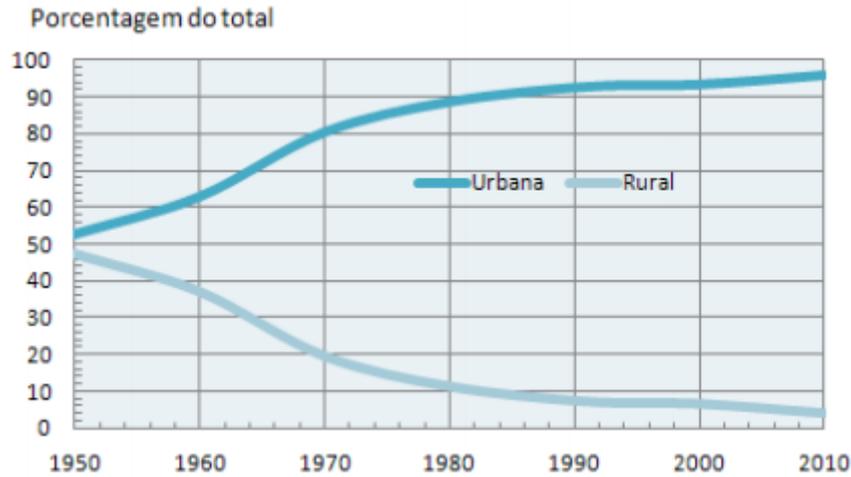
2.1 Planejamento Urbano

O planejamento urbano surgiu no fim do século XIX e início do século XX na Europa e Estados Unidos como resposta aos problemas urbanos surgidos nas cidades em pleno processo de industrialização (SILVA, 2016, p.9). A necessidade de haver planejamento se deu devido ao alto índice de crescimento da população de forma desenfreada.

De acordo com Silva (2016), o processo de urbanização dos espaços é dinâmico, pois é estabelecido com base nas transformações das cidades a partir da sua própria história e contexto de crescimento durante sua evolução no tempo. Ou seja, a cidade é vista como um espaço transformado por ações humanas.

Na atualidade, com o desenvolvimento e o crescimento da população humana, a ocupação e uso do solo têm aumentado exponencialmente. Em todo o mundo é possível observar que este desenvolvimento tem feito com que a população ocupe cada vez mais os centros urbanos e suas periferias, provocando adensamento e congestionamento dos centros das cidades metropolitanas. Docampo (2018), afirma que nos últimos anos nem o meio rural e nem as cidades cresceram, o que de fato cresceu foram as periferias.

O Brasil, por exemplo, apresentou ao longo das últimas décadas, um crescimento significativo da população urbana (TUCCI, 1997). O último censo levantado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) revelou que a população brasileira é superior a 209 milhões de habitantes, onde cerca de 85% desses habitantes estão localizados em áreas urbanas. Scarati (2012) revela que 95% dos habitantes do estado de São Paulo vivem nas cidades e apresenta na Figura 1, como a velocidade dessa ocupação foi drástica a partir do ano de 1960.

Figura 1 – População no Estado de São Paulo

Fonte: Scarati, 2012.

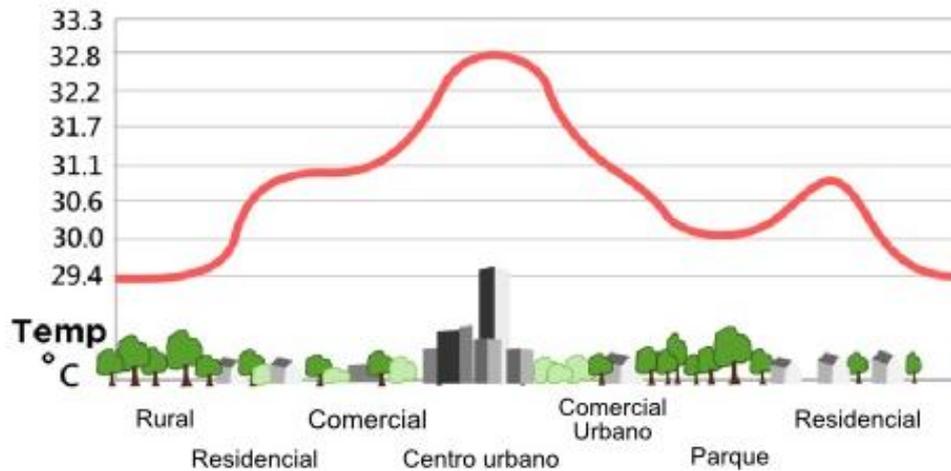
O crescimento e ocupação das cidades ocorrem, na maioria das vezes, de modo desordenado com pouco ou nenhum planejamento, gerando transtornos no meio urbano. Segundo Jabur *et al.* (2015), o desequilíbrio nos núcleos urbanos é responsável por diferentes impactos ambientais e sociais, tais como: a falta de moradia, saneamento básico e as inundações urbanas.

Devido à grande demanda exigida por tal crescimento, as cidades estão ficando mais densas, com a maior parte de sua área ocupada por edifícios, rodovias e obras de infraestrutura urbana. Ou seja, o espaço verde está perdendo lugar para as edificações, que por sua vez, impermeabilizam a superfície do solo gerando problemas de drenagem urbana e contribuindo para o surgimento de ilhas de calor. Para Barros, Rufino e Miranda (2016), cidades onde o adensamento acontece bruscamente correm o risco de um colapso dos sistemas de infraestrutura urbana.

De acordo com o Manual Técnico de Drenagem Urbana do Distrito Federal (MTDU-DF, 2009), as ilhas de calor são geradas por causa das superfícies impermeáveis que absorvem parte da energia solar, aumentando a temperatura ambiente nos centros urbanos (Figura 2). Isso acontece porque, tanto o asfalto quanto o concreto, devido às suas características e peculiaridades absorvem mais energia que as superfícies com cobertura vegetal. Quer dizer, ao passo que a absorção de radiação solar diminui, maior é a emissão de radiação térmica para o ambiente, produzindo calor. Para Holtz (2011), este fenômeno

contribui para o efeito estufa e impacta negativamente o meio ambiente. Semelhantemente, Tucci (1997) afirma que o desenvolvimento urbano brasileiro tem produzido aumento significativo na frequência das inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água.

Figura 2 – Gráfico Ilustrativo Sobre Temperatura no Ambiente Urbano



Fonte: Brasil Escola, em: <https://bit.ly/2NxEHn8> (acesso em 30/08/2018).

Algumas cidades estão congestionadas de tal forma que não há mais espaço para crescimento. Na realidade, nos últimos tempos, nem os centros urbanos e nem o meio rural estão crescendo. O que realmente tem aumentado são as regiões periféricas das cidades. Sendo assim, uma boa parte da congestão dos centros urbanos não é causada pela população residente, mas sim por habitantes das periferias que precisam usufruir dos recursos que um centro urbano oferece como mercado de trabalho, educação e saúde.

Tucci (2002), em uma de suas pesquisas, expõe como o crescimento da população urbana tem sido acelerado nas últimas décadas no Brasil, e ressalta como este crescimento gerou e continua gerando expansão irregular em áreas periféricas de centros urbanos.

Geralmente, a ocupação irregular de áreas da periferia é realizada sem seguir as regulamentações ou normas de loteamento. A ocupação do solo ocorre de maneira irregular, habitualmente localizando-se próximo aos mananciais de onde a população retira água e a contamina por falta de coleta e tratamento de esgoto, comprometendo assim a pureza de nascentes. Sem um planejamento adequado é impossível atender às demandas relacionadas à habitação que são solicitadas pela população. Não há dúvidas de que o desenvolvimento

urbano é necessário, porém, sem planejamento é impossível atender a todas as demandas do ser humano.

Deste modo, observa-se que de fato os centros urbanos estão congestionados. É preciso que os planejamentos urbanos sejam mais bem desenvolvidos e que decisões sejam tomadas para reduzir os problemas gerados pelo adensamento urbano. Por exemplo, ao melhorar a condição e a integração dos transportes públicos de uma cidade as pessoas tendem a deixar de usar seus carros para utilizar o transporte público. Isto diminuiria consideravelmente o tráfego nas vias urbanas, melhorando a acessibilidade da população. Outros exemplos seriam o de alterar a concepção de edificações visando a sustentabilidade, o reuso de recursos, a diminuição das áreas impermeáveis, a criação de políticas públicas sobre conscientização da população, etc.

Pode-se observar que o planejamento urbano ainda é uma questão que precisa ser avaliada com mais cautela e preparação dos profissionais. A cidade precisa ser pensada para atender à população por meios sustentáveis que proporcionem qualidade de vida para todos os habitantes da região. Para atingir tal nível de planejamento, Silva (2016) sugere que a cidade seja planejada não somente por urbanistas, mas também por profissionais de áreas diversas como sociólogos, historiadores, economistas, geógrafos, entre outros.

2.2 Drenagem Urbana

A impermeabilização do solo gerada pelo intenso adensamento da população está contribuindo para a formação de lâminas de água na superfície e, conseqüentemente, promovendo o escoamento superficial. O volume do escoamento superficial é definido pela quantidade de água precipitada, juntamente com as características da superfície onde ela escoar, podendo ser o tipo de cobertura do solo, topografia, capacidade de infiltração do solo, sistemas de drenagem, entre outros. Em concordância com Vigiliis (2009), que em sua pesquisa afirma que o escoamento superficial é afetado por alterações da cobertura do solo, mudanças nos sistemas de drenagem, retificação e canalização de cursos d'água e pela ocupação urbana de várzeas com aterros, sistemas viários e a impermeabilização de parte da área ocupada.

Na maioria das vezes a infiltração da água no solo não é instantânea, dependendo das características do solo, a água leva mais ou menos tempo para infiltrar, contribuindo para eventos intensos de inundações e enchentes. Isto ocorre por causa dos sistemas de drenagem que não estão sendo eficazes para drenar totalmente as águas pluviais nos centros urbanos, o que contribui para o aumento do volume de escoamento superficial. Scarati (2012) aponta que as falhas dos sistemas de drenagem das bacias urbanas expressadas pela falta de espaço para escoamento das águas no período de cheias e todas as suas decorrências, não podem ser atribuídas à mãe natureza e sim ao uso do solo e ao desrespeito aos princípios da dinâmica fluvial que rege o comportamento dos cursos d'água naturais.

Em conformidade com Tucci (2003), o desenvolvimento urbano transforma a cobertura vegetal provocando vários efeitos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural, com a impermeabilização do solo através de telhados, ruas, calçadas e pátios, a água que infiltrava, passa a escoar pelos condutos, aumentando o escoamento superficial. Sendo assim, o volume de água que anteriormente ficava retido pela vegetação agora escoar no canal, exigindo maior capacidade nos sistemas de drenagem urbana.

A drenagem urbana é composta de medidas que tenham como propósito minimizar os riscos, reduzir os prejuízos causados por inundações, proporcionando o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável (VAZ, 2004). Tucci (2003) complementa o conceito afirmando que a drenagem urbana envolve a rede de coleta de água (e resíduos sólidos) sobre as superfícies urbanas, o seu tratamento e o retorno aos rios. Ou seja, a drenagem é o gerenciamento da água da chuva que escoar no espaço urbano (OLIVEIRA, 2017, p.23). Vale apontar que desde os primórdios da civilização o homem passou a interferir na natureza. Esta interferência resultou em diferentes impactos ambientais que conseqüentemente alteram o meio ambiente e o prejudicam, seja em maior ou menor escala (HOLTZ, 2011, p.1).

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. De acordo com Suderhsa (2002), os projetos de drenagem urbana têm como filosofia o escoamento da água precipitada o mais rápido possível para fora da área em que ela se projeta. Este critério aumenta em várias ordens de magnitude a vazão máxima, a frequência e o nível de inundação de jusante (TUCCI, 2003, p.89).

A inundação em áreas urbanas ocorre quando as águas saem do sistema de escoamento devido sua baixa capacidade de transporte, transbordando e inundando áreas ocupadas pela população. Para Tucci (2003), este tipo de evento pode ocorrer devido ao comportamento natural dos rios, pela alteração produzida pelo homem na urbanização impermeabilizando a superfície e devido à canalização dos rios.

As medidas de controle de inundação possuem como objetivo minimizar os danos causados por inundações. Elas são classificadas como estruturais e não estruturais. A primeira delas é definida por soluções que necessitam do uso de técnicas e tecnologias para suportar, conter ou reduzir os impactos gerados por inundações, por exemplo: bacias de retenção, poços e trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis, entre outros. As medidas não estruturais são aquelas voltadas para a educação e conscientização da população por meio da criação de políticas e ações públicas para a criação de áreas de proteção, reflorestamento, etc.

Como instrumento para instruir profissionais e agentes públicos, o Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT), contemplado na Lei Complementar N° 803, de 2009, estabelece em seu artigo 16 as seguintes diretrizes setoriais para os recursos hídricos, compreendidos pelas águas superficiais e subterrâneas:

- I. Promover o uso racional, a proteção e a recuperação dos recursos hídricos, mantendo sua disponibilidade em quantidade e qualidade suficientes para as atuais e futuras gerações;
- II. Assegurar o uso múltiplo das águas, sendo priorizada, nos casos de escassez, a sua utilização para o abastecimento humano e a dessedentação animal;
- III. Respeitar a capacidade de suporte dos corpos hídricos superficiais na exploração de água e como receptores de efluentes, em especial a do lago Paranoá e a dos mananciais destinados ao abastecimento da população e suas bacias de drenagem;
- IV. Respeitar a capacidade de suporte dos aquíferos, especialmente nas regiões sem rede pública de abastecimento de água;
- V. Controlar a impermeabilização do solo, de forma a manter a capacidade de infiltração e de recarga dos aquíferos;
- VI. Realizar monitoramento da qualidade e da quantidade da água de mananciais superficiais e subterrâneos;
- VII. Promover o enquadramento dos corpos hídricos do Distrito Federal em classes, segundo os usos predominantes;
- VIII. Instituir instrumentos econômicos e incentivos fiscais destinados à promoção, conservação, preservação, recuperação e gestão dos recursos hídricos do Distrito Federal. (BRASIL, 2009)

Para Scarati (2012) a gestão da drenagem urbana abrange um conjunto de técnicas e ações, definidas por ele como o conceito dos 3P: Planejamento, Procedimento e Preparo.

Onde o *planejamento* inclui atividades como a criação de planos diretores de drenagem urbana, projetos e implantação de sistemas de redução de risco por meio de medidas estruturais e não estruturais. Já o *procedimento* engloba a operação e manutenção dos sistemas estruturais implantados juntamente com a adoção de medidas de sustentação por meio de campanhas de conscientização. O *preparo* por sua vez, compreende a organização de resposta às emergências relacionadas aos sistemas de drenagem urbana, ou seja, planos de ação emergenciais para minimizar os danos e eliminar perdas fatais.

O Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano deve ser definido com base em alguns princípios que Tucci (2003) destaca como sendo essenciais para o bom desenvolvimento de um programa consistente de drenagem urbana, sendo eles os seguintes:

1. Plano Diretor de Drenagem urbana como parte do Plano de Desenvolvimento urbano, fazendo com que a drenagem seja planejada juntamente com infraestrutura urbana;
2. O escoamento durante eventos de chuva não pode ser ampliado devido interferência de usuários urbanos por ocupação da bacia;
3. Bacias hidrográficas localizadas em meio a urbanização devem ser contempladas no plano de controle da drenagem urbana para evitar que o impacto ocorrido em uma bacia não seja transferido para outra;
4. Compatibilização de projetos para minimizar impactos ambientais devido ao escoamento de águas pluviais;
5. O Plano Diretor de Drenagem urbana deve contemplar o planejamento de áreas a serem desenvolvidas e/ou a densificação de áreas já ocupadas, visto que com uma ação pública prévia, as consequências de um desastre seriam evitadas;
6. Política de controle de enchentes com soluções estruturais, não estruturais compatibilizadas com o desenvolvimento urbano esperado;
7. Os planos de controle devem considerar a bacia como um todo e não em trechos isolados;
8. Os meios de implantação do controle urbano sendo: o Plano Diretor Urbano Ambiental, estabelecendo as linhas principais, as Legislações controlando o sistema e os Manuais de Drenagem orientando;
9. Controle permanente de enchentes, com previsão, proteção e fiscalização para evitar violações durante a ocupação do solo em áreas de risco;

10. A educação de profissionais como engenheiros, arquitetos, agrônomos, administradores públicos, entre outros profissionais, para que as decisões públicas sejam tomadas conscientemente por todos;
11. O custo da implantação das medidas estruturais e manutenção desses sistemas deve ser transferido aos proprietários dos lotes, proporcionalmente a sua área impermeável, que é geradora de volume adicional em escoamento superficial;
12. Gestão eficiente na manutenção de drenagem e na fiscalização da regulamentação.

De acordo com Oliveira (2017), para amenizar o problema é necessário investir em materiais e métodos que se apliquem na área montante, impedindo que a precipitação chegue ao sistema de drenagem com a velocidade, o volume e poluentes aumentados. Algumas soluções eficientes para drenagem urbana são descritas por Tucci (2001, p.805) como dependente dos seguintes fatores:

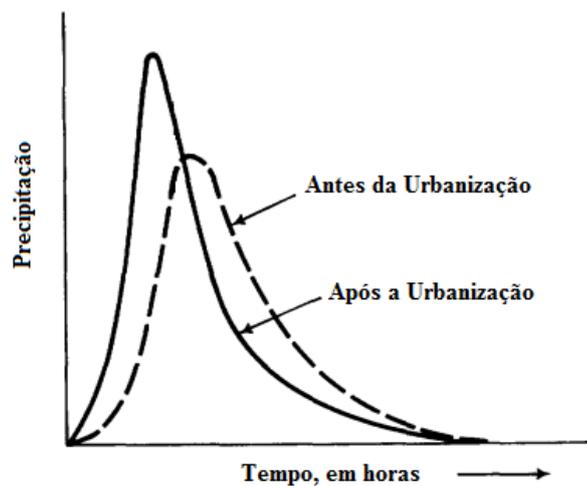
- Existência de uma política para o setor que defina objetivos a serem alcançados e os meios (legais, institucionais, técnicos e financeiros) para atingi-los;
- Existência de uma política para ocupação do solo urbano devidamente articulada com a política de drenagem urbana;
- Processo de planejamento que contemple medidas de curto, médio e longo prazo em toda a bacia, e integre as medidas de drenagem de águas pluviais no complexo maior do ambiente urbano;
- Existência de entidade eficiente que domine as tecnologias necessárias, implante obras e medidas, desenvolva as atividades de comunicação social e etc;
- Domínio da tecnologia adequada para planejamento, projeto, construção e operação de obras; e
- Organização de campanhas de educação e esclarecimento da opinião pública.

De fato, é necessária a criação de melhores políticas e gestões para diminuir o agravante problema causado pela má drenagem inserida em áreas urbanas. Vigiliis (2009) destaca que revisões, atualizações de normas e especificações técnicas e procedimentos devem ser pensados objetivando soluções ambientalmente responsáveis, dentro de conceitos pertinentes à sustentabilidade de todos os processos referentes à drenagem urbana.

2.2.1 Sistemas de Drenagem

Os sistemas de drenagem são criados para prevenir inundações locais transportando o fluxo de água o mais rápido possível. O aumento da impermeabilização do solo tem contribuído para elevação dos picos de cheia durante os períodos de tempestade, ou seja, por causa da urbanização as precipitações estão mais rápidas e intensas. A Figura 3 contém um gráfico comparando a intensidade da precipitação antes e depois da urbanização.

Figura 3 – Hidrograma de um evento de precipitação antes e depois da urbanização



Fonte: Adaptado de Leopold, 1968.

A perda da cobertura vegetal para uso agrícola e para o crescimento das cidades tem produzido como consequência o aumento da frequência de inundações devido à falta de interceptação da precipitação. Tucci (2003) aponta que a cobertura vegetal protege o solo contra a erosão e tem como efeito a interceptação de parte da precipitação que pode gerar escoamento.

Juntamente com a elevação da intensidade da precipitação em centros urbanos, o volume do escoamento superficial cresce, causando diversos desastres como enchentes, erosões, entre outros. Holtz (2011) ressalta que o problema da drenagem urbana se agrava em muitas cidades devido ao uso de sistemas mistos, com a interligação de condutos pluviais e sistemas de esgoto, ocasionando sérios problemas ambientais e aumentando o custo do tratamento das águas. Por essa razão, controlar o fluxo do escoamento superficial de forma efetiva por meio dos sistemas de drenagem é de extrema importância para o desenvolvimento e segurança do meio urbano.

O sistema de drenagem é dividido em duas categorias: micro e macro drenagem. A primeira delas é definida por Scarati (2012) como sistema de drenagem que compreende tudo o que é construído para garantir o funcionamento do sistema viário e dar acesso aos lotes e habitações, ou seja, é um sistema primário da drenagem urbana. De acordo com Guedes (2015) o sistema de micro drenagem é composto por pavimentos das ruas, sarjetas, bocas de lobo, rede de galerias de águas pluviais, dentre outros. Já os dispositivos de macro drenagem são sistemas de maiores dimensões que agrupam diversos canais de micro drenagem. São caracterizados por sistemas estruturais como túneis, barragens entre outros sistemas com grande capacidade de fluxo e armazenamento de águas, substituindo malhas hídricas originais como rios e córregos. Canholi (2014) complementa afirmando que esses sistemas incrementam o processo da infiltração, retêm o escoamento, e/ou retardam o fluxo em córregos e rios.

Segundo Guedes (2015), os sistemas de drenagem mais comuns utilizados hoje no Brasil, concebidos para tentar solucionar os problemas gerados por águas pluviais, são baseados na teoria higienista, que consiste na canalização do escoamento com a intenção de escoar o fluxo de um ponto a outro o mais rápido possível. Eles são conhecidos como sistemas convencionais de drenagem, que de acordo com Guedes (2015) não comportam mais o escoamento atual da água da chuva.

Outro sistema de drenagem é o sistema de drenagem alternativo ou sustentável, que são medidas estruturais que permitem a infiltração e o armazenamento total ou parcial do escoamento superficial.

Com o intuito de instruir profissionais, Woods-Ballard *et al.* (2007) escreveram o Manual de Sistemas de Drenagem Sustentáveis (SuDS). O manual serve de guia para planejar, projetar, construir, operar e fazer manutenções em sistemas de drenagem. A intenção dos autores é de substituir os tradicionais sistemas canalizados por sistemas naturais e sustentáveis de captação, armazenamento e devolução da água para o solo.

O Manual de Sistemas de Drenagem Sustentáveis (SuDS) tem como objetivo minimizar os impactos do desenvolvimento urbano na quantidade e na qualidade do escoamento superficial, maximizando os cuidados e preservação da biodiversidade do local. Sendo assim, os sistemas de drenagem sustentáveis são criados tanto para gerenciar os

desastres ocasionados pelo escoamento superficial em áreas urbanas quanto para contribuir, sempre que possível, para a qualidade e preservação do meio ambiente. Apesar de ter sido projetado para atender às necessidades do Reino Unido na Europa, o manual traz diversas informações sobre sistemas de drenagem que são conhecidas e muito utilizadas no Brasil. Estão listados no Quadro 1 (a) e (b) alguns exemplos típicos de sistemas de drenagem sustentáveis descritos por Woods-Ballard *et al.* (2007).

Quadro 1 (a) – Sistemas Típicos de Drenagem Alternativa

Tipo de Sistema	Descrição	Exemplo
Valetas de Infiltração	Canais largos e rasos com cobertura vegetal. São projetadas para transportar e/ou armazenar a água do escoamento e permitindo a infiltração da água (dependendo das condições do solo).	
Bacias de Infiltração	Depressões na superfície projetadas para armazenar o escoamento e permitir a infiltração da água no solo.	
Tanques ou Reservatórios	Fornecem armazenamento temporário para águas de escoamento superficial de grandes tempestades.	

Quadro 1 (b) – Sistemas Típicos de Drenagem Alternativa - Continuação

Tipo de Sistema	Descrição	Exemplo
Filtros Drenantes	Trincheiras preenchidas com material permeável. A água superficial do pavimento flui para as trincheiras, em seguida é filtrada e transportada para outro local de armazenamento ou infiltração.	
Superfície permeável	Permite a infiltração da água da chuva por meio de uma superfície permeável, onde a água é armazenada antes de infiltrar totalmente no solo.	
Telhados verdes	Sistemas que cobrem o telhado com vegetação. São instalados sobre uma rede de drenagem acompanhada de camadas de proteção, impermeabilização e isolamento.	

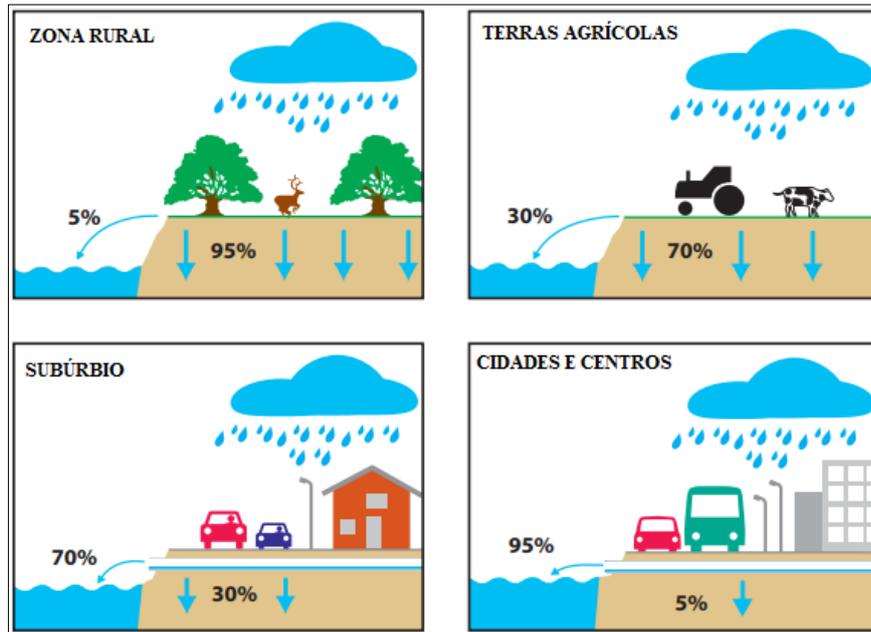
Fonte: Adaptado de Woods-Ballard *et al.*, 2007.

2.3 Infiltração

A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. Por isso, é um processo que depende fundamentalmente de água estar desimpedida para infiltrar no solo, da natureza do solo, do estado da superfície e das quantidades de água e vazios, inicialmente presentes no seu interior (SILVEIRA, A., *et al.*, 2001).

Ao passo que a urbanização das cidades cresce, as áreas de infiltração de água no solo estão sendo reduzidas. De acordo com a Figura 4, uma região em zona rural com cobertura florestal, 95% das águas pluviais se infiltra no solo, enquanto nos centros urbanos esta taxa diminui para 5%.

Figura 4 – Percentuais de Infiltração de Águas Pluviais



Fonte: Adaptado de INTERPAVE, 2010.

Tendo em vista esta realidade, é natural que o poder público e os órgãos normativos exijam que profissionais da área de construção, como engenheiros e arquitetos, ao realizarem projetos arquitetônicos urbanos considerem a taxa de infiltração definida pelo código de obras do município onde a edificação será executada. De acordo com o Manual Técnico de Drenagem Urbana do Distrito Federal (MTDU-DF, 2009), os dispositivos usuais de infiltração são: pavimentos permeáveis, mantas ou planos de infiltração, valas, bacias e poços de infiltração.

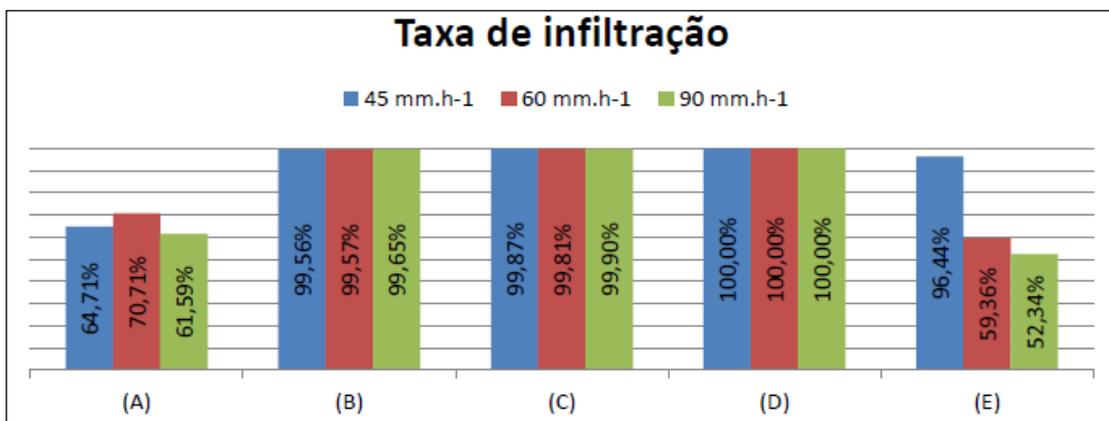
Uma das alternativas para reduzir o impacto gerado pela impermeabilização do solo está na construção de pavimentos permeáveis. Este tipo de pavimento possibilita o direcionamento da água da chuva para o solo de acordo com sua capacidade de drenagem. Outro ponto favorável deste tipo de estrutura está na possibilidade de proporcionar ao pavimento não apenas a função de suportar as cargas de veículos e pedestres, mas também

contribuir para a infiltração de água no solo, podendo servir como reservatório temporário, para que a água não escoe na superfície, enquanto a água infiltra no solo.

Santos (2016), em sua pesquisa sobre o impacto da utilização de pavimentação permeável em áreas urbanas, comparou a eficiência de infiltração entre piso drenante (pavimento com placas de concreto permeável) e *paver* (peças de concreto com juntas alargadas). Sua intenção era mostrar qual destes métodos construtivos é mais indicado para reduzir os problemas causados pelo escoamento superficial em áreas urbanas.

Para desenvolver o trabalho, Santos (2016) simulou precipitações em intensidades variadas de chuva, 45 mm.h-1, 60 mm.h-1 e 90 mm.h-1. Em seguida, mediu a capacidade de infiltração em cada umas das tecnologias em estudo: concreto impermeável (A), concreto com juntas alargadas (B), concreto permeável (C), solo com cobertura vegetal (D) e solo sem cobertura (E). A Figura 5 contém um quadro comparativo das taxas de infiltração estudadas pelo autor.

Figura 5 – Comparativo de taxas de infiltração no solo



Fonte: Santos, 2016.

No final da sua pesquisa, Santos (2016) concluiu que ambas as tecnologias de pavimento permeável, utilizadas como cobertura de solo, possuem taxa de percolação semelhante à cobertura de grama, ou seja, podem sim ser utilizadas como tecnologia para infiltração de água no solo e auxiliar na recuperação de bacias hidrográficas de zonas urbanas.

2.4 Pavimento Permeável

Cabe aqui, primeiramente, distinguir pavimento permeável de pavimento drenante, pois ainda é muito comum o uso incorreto desses termos. O pavimento drenante é aquele que possui uma capa e um sistema de coleta, neste caso a água é drenada para outro destino, ou seja, a água não passa pela estrutura do pavimento. Já no pavimento permeável a água vai direto para o solo, passando antes por uma camada de armazenamento composta por brita que no ponto de vista hidráulico é considerado camada de armazenamento temporário ou definitivo, e também funciona como camada estrutural, absorvendo a carga de rolamento e dissipando no subleito.

O conceito de pavimento permeável foi proposto no final da década de 1960 para promover a percolação, reduzir as cargas nos esgotos, reduzir inundações, aumentar os lençóis freáticos e reabastecer os aquíferos (THELEN, 1978 *apud* HANSEN, 2008). Para auxiliar nos critérios que seriam utilizados neste tipo de pavimento foi criada a Agência de Proteção Ambiental - EPA, em 1980, nos Estados Unidos. O objetivo geral era de determinar os fatores que influenciavam no escoamento superficial e na qualidade da água escoada por meio de obras experimentais, testando diferentes tipos de pavimento permeável. Por isso, diversos tipos deste pavimento foram construídos após a década de 1970, alguns com sucesso outros com falhas, sendo, na sua maioria, experimentos com resultados positivos. Nos locais onde o pavimento permeável não atendeu às expectativas, foi devido à colmatação dos poros do pavimento por argila, silte e outros materiais finos, diminuindo sua capacidade de infiltração.

Hoje em dia, os pavimentos permeáveis são bastante utilizados em países como Canadá, Estados Unidos e alguns países da Europa dado às condições climáticas e nível de desenvolvimento em obras de infraestrutura. No Brasil, este tipo de pavimento ainda é muito pouco utilizado e pesquisas, como o presente trabalho, estão sendo desenvolvidas para que este sistema construtivo seja difundido em todo o país para melhorar as condições ambientais, aumentar escoamento superficial e reduzir os desastres que são gerados por enchentes.

Para Field, Masters e Singer (1982), o pavimento permeável é uma técnica que gerencia as águas pluviais e pode ser utilizada em estacionamentos ou em estradas com baixo volume de tráfego. Além disso, possibilita a recarga de aquíferos e reduz custos em obras de sistemas de drenagem. O problema mais comum que se tem com os pavimentos

convencionais é o escoamento superficial. Se a água da chuva não pode infiltrar no solo onde ela cai, ela vai escoar (MILLER, 1989).

Na Figura 6 está representado um pavimento permeável que foi construído ao lado de um pavimento convencional em um estacionamento no estado de Iowa, nos Estados Unidos da América (EUA). Com o auxílio de um caminhão pipa foi demonstrado como o pavimento permeável, à direita, drena a água rapidamente enquanto no pavimento convencional, à esquerda, uma lâmina de água é formada na superfície do pavimento (HANSEN, 2008).

Figura 6 – Demonstração da eficiência de um pavimento permeável em estacionamento



Fonte: Hansen, 2008.

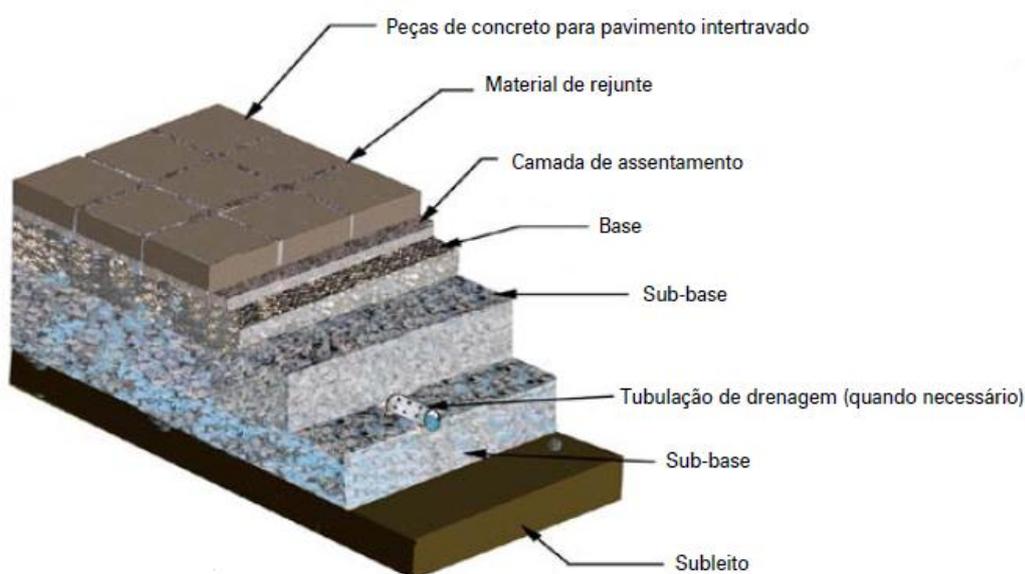
Segundo a NBR 16.416 (ABNT, 2015), o pavimento permeável é um pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura. Sendo assim, sua estrutura permite que a água fique armazenada na sua camada de base enquanto ela infiltra no solo. Ele é dimensionado para comportar o volume de água necessário para que não haja lâminas d'água no pavimento ou escoamento superficial enquanto transmite as cargas de rolamento para o subleito.

De acordo com Carvalho, Farias e Rezende (2012) os pavimentos permeáveis são construídos com a finalidade de possibilitar a infiltração de águas pluviais, ou parte delas, que caem sobre sua superfície, transferindo a água infiltrada diretamente para o solo e permitindo uma recarga parcial do lençol freático.

Para Santos (2016), os pavimentos permeáveis são instalados no intuito de possibilitar a infiltração da água, retardando o tempo de escoamento superficial e tentando devolver ao solo a capacidade de infiltração anterior à urbanização. Neste sentido, o pavimento permeável é um dispositivo de infiltração que absorve inteiramente ou parte do escoamento através de uma superfície permeável para dentro de um reservatório de brita de graduação uniforme construída sobre o perfil do terreno (VIGILIIS, 2009).

O objetivo deste tipo de pavimento é minimizar os impactos da urbanização atuando na quantidade e qualidade do escoamento superficial de forma sustentável. Na Figura 7 está ilustrado o perfil típico de um pavimento permeável.

Figura 7 – Seção tipo de pavimento permeável



Fonte: Marchioni e Silva, 2011a.

De acordo com o boletim técnico da WAPA (2015), ao contrário dos pavimentos convencionais, os pavimentos permeáveis são tipicamente construídos sobre um subleito não compactado, maximizando assim a infiltração da água no solo. Assim sendo, o pavimento permeável é composto normalmente com as seguintes camadas: revestimento com placa de concreto permeável de cimento Portland ou asfalto, sobre uma camada de material de assentamento (areia); base granular composta por brita; sub-base com material um pouco menos resistente que a camada de base (quando necessária); subleito que à rigor não faz parte

da estrutura do pavimento, e, quando necessário, tubulação de drenagem para escoamento do excesso de água.

Como todos os sistemas construtivos, o pavimento permeável traz consigo diversos benefícios aos usuários e ao meio urbano, e também alguns inconvenientes, descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Benefícios e inconveniências do pavimento permeável

Benefícios	Inconveniências
Reduz o volume do escoamento superficial e os índices de picos de descarga	Existe a possibilidade de contaminação do lençol freático
Aumenta a capacidade de infiltração ou recarga do lençol freático	Necessita que sejam feitas inspeções regulares para verificar a eficiência do pavimento
Melhora a qualidade de água, pois as camadas do pavimento contribuem como material de capacidade filtrante	Exige manutenção periódica para evitar a colmatação dos poros e o possível crescimento de ervas daninhas
Reduzir a temperatura da água da chuva e os efeitos das ilhas de calor geradas pelo pavimento	
Reduz o custo e a dimensão infraestruturas de sistemas de drenagem	
Melhora a superfície do pavimento evitando a formação de laminais d'água sobre o pavimento, melhorando as calçadas para pedestres	

Fonte: Eisenberg, Lindow e Randolph, 2015; Marchioni e Silva, 2011a; Pinto, 2011; Woods-Ballard *et al.*, 2007.

É evidente que este sistema construtivo possui mais benefícios do que inconveniências, uma vez que para que seu desempenho seja mantido, a estrutura necessita de inspeções e manutenções periódicas, assim como qualquer outro sistema estrutural.

2.4.1 Revestimento do Pavimento Permeável

Existem diversas alternativas para o revestimento do pavimento permeável podendo ser composto por diferentes tipos de blocos ou camada de asfalto poroso. Para Butler e Davies (2011) os revestimentos podem ser *porosos*, permitindo a passagem da água no seu interior,

ou *permeáveis*, onde o material não é necessariamente poroso, mas permite a passagem da água entre as juntas dos blocos.

Os revestimentos porosos, geralmente feitos com material ligante de cimento ou de asfalto, possuem em sua composição agregados de graduação aberta, ou seja, com poucos agregados miúdos para garantir vazios em seu interior e permitir a passagem da água.

Para Oliveira (2017) a dosagem do material de revestimento varia de acordo com a finalidade para qual foi desenvolvido, porém precisa alcançar o equilíbrio entre índice de vazios, resistência e capacidade de trabalho.

De acordo com Delatte (2005), existem três tipos de concreto permeável que variam de acordo com sua permeabilidade e resistência mecânica. O primeiro deles é chamado de concreto permeável hidráulico que possui baixa resistência, contudo possui grande capacidade permeável. O segundo é chamado de concreto permeável normal, este mantém proporcionalidade entre permeabilidade e resistência do revestimento. Por último, concreto permeável estrutural que não é tão permeável, mas suporta maior carga, este é indicado para pavimentos com cargas mais elevadas.

Os tipos mais comuns de revestimentos utilizados em pavimentos permeáveis estão ilustrados no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 – Tipos de revestimentos típicos do pavimento permeável

Tipo	Características	Exemplo Ilustrado
Pavimento Poroso	Placas de concreto composta por duas camadas, onde a superfície superior funciona como camada filtrante e a segunda com alta porosidade para permitir a rápida infiltração da água.	
Blocos Intertravados	Blocos de concreto com espaçadores para garantir uma junta larga entre eles. As juntas podem ser preenchidas com pedregulho, areia ou grama.	
Blocos com Áreas Vazadas	As áreas vazadas permitem o crescimento de grama que auxiliam na infiltração da água no pavimento. Também reduz o superaquecimento do pavimento.	
Blocos com Canais Laterais	As juntas desse sistema são preenchidas com mineral permeável que garante o rápido transporte da água.	

Fonte: Dierkes, *et al.*, 2004.

Para avaliar o escoamento superficial em dois tipos de pavimento permeável, Alessi, Kokot e Gomes (2006) realizaram ensaios com simulação de chuva para avaliar o teor de

umidade no solo e a tensão da água no solo em pavimentos com revestimento de blocos de concreto e revestimento de asfalto poroso. Ao final de sua pesquisa, Alessi, Kokot e Gomes (2006) verificaram que os desempenhos dos pavimentos são similares, obtendo como coeficiente de escoamento superficial de 0,37 para o pavimento em blocos de concreto e 0,35 para o pavimento em asfalto poroso, concluíram também que quando comparado com o pavimento convencional os pavimentos permeáveis possuem melhor desempenho quanto ao quesito escoamento superficial.

Sendo assim, pode-se entender que o tipo de revestimento do pavimento permeável pode ser definido de acordo com a produção e disponibilidade dos materiais na região.

Não há dúvidas que o revestimento permeável possui diversos benefícios, porém, existe a possibilidade de colmatção dos seus poros durante sua vida de utilização, alterando suas características de permeabilidade (BATEZINI, 2013). A colmatção nada mais é que a obstrução dos poros do revestimento por sólidos acumulados, ou seja, sedimentos encontrados na água infiltrada (OLIVEIRA, 2017). Esses sedimentos geralmente são localizados nas proximidades do pavimento, podendo ser partículas de areia, silte, argila, matéria orgânica como folhas ou detritos transportados com o vento, água e com o tráfego de veículos.

Essas partículas vão se depositando na superfície e com o tempo vão se alojando nos poros do pavimento, formando um tipo de crosta que selam os poros impedindo a passagem da água (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). De acordo com Pratt, Mantle e Schofield (1995), o fenômeno da colmatção reduz a taxa de infiltração do pavimento, causando transbordamento e alagamento quando a intensidade da chuva é maior que a taxa de infiltração do pavimento.

Para evitar que o desempenho do pavimento permeável seja reduzido devido à colmatção de seus poros é necessário a prática de manutenções periódicas no pavimento. Marchioni e Silva (2011b) afirmam que a remoção dos sedimentos pode ser feita por meio de varrição com aspiração e, quando em casos mais severos de colmatção, remover ou trocar o material que compõe as juntas do revestimento. Marchioni e Silva (2011b) também recomendam que a manutenção seja feita uma ou duas vezes por ano, conforme a necessidade.

2.4.2 Camada de Assentamento

A camada de assentamento é utilizada no pavimento permeável apenas quando seu revestimento é composto por placas intertravadas ou placas permeáveis. Esta camada tem a função de acomodar melhor as placas de revestimento e nivelar o pavimento.

A camada de assentamento deve ser composta por material de granulometria aberta, ou seja, agregados com dimensões parecidas e com pouca quantidade de material fino, proporcionando vazios na camada.

O material utilizado para compor a camada de assentamento do pavimento permeável, geralmente areia grossa, deve seguir especificações mínimas de propriedades que estão representadas na Tabela 1 e especificações de distribuição granulométrica da Tabela 2, ambas determinadas pela NBR 16.416 (ABNT, 2015).

Tabela 1 – Especificação para o material de assentamento

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão Los Angeles	ABNT NBR NM 51	< 40%
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32%
Material passante na peneira #200	ABNT NBR NM 46	≤ 2 %
Dimensão máxima característica	ABNT NBR 7212	9,5 mm

Fonte: ABNT NBR 16.416, 2015.

Tabela 2 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de assentamento

Peneira com abertura de malha	Porcentagem retida, em massa %
12,5 mm	0
9,5 mm	0 a 15
4,75 mm	70 a 90
2,36 mm	90 a 100
1,16 mm	95 a 100

Fonte: ABNT NBR 16.416, 2015.

2.4.3 Camada de Base

A camada de base possui a função de resistir e distribuir as cargas do pavimento, além de ter capacidade de armazenamento de água da chuva. Para atender a estas demandas o

material deve possuir propriedades mínimas especificadas pela NBR 16.416 (ABNT, 2015), representadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificação para o material de sub-base e/ou base

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão Los Angeles	ABNT NBR NM 51	< 40%
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32%
Índice de suporte Califórnia (CBR)	ABNT NBR 9895	≤ 80 %
Material passante na peneira #200	ABNT NBR NM 46	≤ 2 %

Fonte: ABNT NBR 16.416, 2015.

Para garantir sua função de reservatório de água temporário, a camada de base deve possuir espaços vazios dentro de sua estrutura, sendo assim, o material deve conter distribuição granulométrica aberta, seguindo as porcentagens recomendadas pela NBR 16.416 (ABNT, 2015) na Tabela 4.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica recomendada para o material de sub-base e/ou base

Peneira com abertura de malha	Porcentagem retida, em massa %	
	Sub-base	Base
75 mm	0	-
63 mm	0 a 5	-
50 mm	30 a 65	-
37,5 mm	85 a 100	0
25 mm	90 a 100	0 a 5
19 mm	95 a 100	0 a 35
12,5 mm	-	40 a 75
4,75 mm	-	90 a 100
2,36 mm	-	95 a 100

Fonte: ABNT NBR 16.416, 2015.

2.4.4 Subleito

Subleito é o nome que se dá ao solo sobre o qual o pavimento é construído. Apesar de não fazer parte da estrutura do pavimento permeável, o estudo do subleito é de extrema importância, uma vez que sua capacidade de infiltração interfere diretamente no dimensionamento hidráulico.

Além do mais, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2018) recomenda a verificação de algumas características do subleito para saber se o solo está apto para receber a estrutura do pavimento. Sendo assim, são recomendados os ensaios de granulometria, limite de liquidez e plasticidade, teor de umidade natural, massa específica aparente in situ, curvas de compactação com cinco pontos na energia proctor normal, índice de suporte Califórnia e expansão do solo.

2.4.5 Sistemas de Infiltração do Pavimento Permeável

Inicialmente, os pavimentos permeáveis podem ser classificados em dois tipos: infiltrantes e armazenadores (PINTO, 2011). Os infiltrantes permitem a infiltração da água da chuva no subleito enquanto os armazenadores possibilitam o armazenamento dessa água em tanques ou reservatórios para serem drenadas por sistemas de micro drenagem.

Os tipos de sistema de infiltração do pavimento permeável de concreto são definidos pela NBR 16.416 (ABNT, 2015) como sistemas de infiltração total, infiltração parcial e sem infiltração, conforme representado na Tabela 5.

Tabela 5 – Tipo de infiltração do pavimento em função das condições locais

Condições locais		Infiltração Total	Infiltração Parcial	Sem Infiltração
Permeabilidade do subleito definida pelo coeficiente de permeabilidade k (m/s)	$> 10^{-3}$	√	√	√
	10^{-3} a 10^{-5}	x	√	√
	10^{-5} a 10^{-7}	x	x	√
Máximo registro do lençol freático a pelo menos 1,0 m da camada inferior da base		x	x	√
Presença de contaminantes no subleito		x	x	√

Fonte: ABNT NBR 16.416, 2015.

A classificação do tipo de sistema de infiltração é feita com base nas condições locais como a permeabilidade do subleito, nível do lençol freático e presença de contaminantes no subleito do pavimento.

O sistema de infiltração total, representado na Figura 8, é aquele que permite a passagem da água por toda a estrutura do pavimento permeável e ao chegar ao subleito, toda a

água se infiltra no solo. Geralmente, este tipo de sistema é instalado em locais onde o solo tem alta capacidade de permeabilidade.

Figura 8 – Sistema de pavimento permeável infiltração total



Fonte: Adaptado de Eisenberg, Lindow e Randolph, 2015.

O sistema de infiltração parcial é instalado em locais onde a capacidade de infiltração do solo é baixa. Representado na Figura 9, o sistema de infiltração parcial é aquele em que parte da água que chega ao subleito se infiltra, o restante da água armazenada é escoada por drenos instalados sobre o subleito.

Figura 9 – Sistema de pavimento permeável infiltração parcial



Fonte: Adaptado de Eisenberg, Lindow e Randolph, 2015.

No sistema sem infiltração, apresentado na Figura 10, a água não infiltra no subleito, por isso, é necessário que exista uma camada drenante na estrutura para drenar a água que fica armazenada nas camadas do pavimento.

Figura 10 – Sistema de pavimento permeável sem infiltração



Fonte: Adaptado de Eisenberg, Lindow e Randolph, 2015.

Para avaliar o desempenho de pavimentos permeáveis, Pinto (2011), em sua tese de doutorado, monitorou pelo período de 06 meses um pavimento permeável do tipo sem infiltração no solo com dois diferentes tipos de revestimento: blocos de concreto de cimento Portland permeável (BCP) e concreto poroso asfáltico (CPA). Para monitorar os pavimentos, Pinto (2011), utilizou como instrumentação: estações pluviométricas e sensores de nível instalados em caixas coletoras, ao final de sua pesquisa, Pinto (2011), concluiu que pavimentos permeáveis são dispositivos eficientes para o amortecimento de picos de cheia.

2.4.6 Permeabilidade

A forma correta de avaliar o desempenho de um pavimento permeável e garantir que ele irá contribuir com a redução do escoamento superficial de água, é medindo a velocidade de infiltração de um volume conhecido de água, isto é, determinando o seu coeficiente de permeabilidade (MARCHIONI E SILVA, 2011c). O coeficiente de permeabilidade é a medida da facilidade que a água tem de fluir através de materiais permeáveis (TERZAGHI, PECK E MESRI, 1996). Ou seja, a facilidade de percolação de água através dos seus poros ou vazios.

O coeficiente de permeabilidade é expresso em unidade de distância por unidade de tempo, e depende de fatores como viscosidade do fluido, granulometria do solo, grau de saturação e estrutura. Para Villela e Mattos (1974), a capacidade de infiltração é a razão máxima com que um solo, numa dada condição, é capaz de absorver água. Villela e Mattos

(1974) ainda apontam que os fatores que podem intervir no fenômeno da infiltração são a umidade, permeabilidade, temperatura do solo e a profundidade do extrato impermeável.

Portanto, conhecer as características de permeabilidade dos materiais que irão compor as camadas do pavimento permeável é essencial para garantir seu desempenho. De acordo com Batezini (2013), o pavimento deve ser construído sobre base de pedra britada de granulometria descontínua, que servirá de reservatório enquanto as águas provenientes da chuva infiltram pelo revestimento. Terzaghi, Peck e Mesri (1996), elaboraram uma tabela de referência com valores de coeficientes de permeabilidade aproximados de acordo com o tipo de solos (Tabela 6).

É importante ressaltar que mesmo existindo valores de referência para classificar a permeabilidade dos tipos de solo, é importante que essas características sejam avaliadas em campo ou em laboratório para verificar a capacidade de percolação que os materiais que irão compor a camada de base e o subleito possuem.

Tabela 6 – Características de permeabilidade e drenagem dos solos

		Coeficiente de permeabilidade k (m/s)											
		10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Drenagem		Boa					Baixa			Praticamente impermeável			
Tipos de Solo	Pedregulho limpo	Areia e pedregulho limpos				Areias muito finas, siltes orgânicos e inorgânicos, misturas de areia, silte e argila, moraina glacial, depósitos estratificados de argila, etc.			Solos "impermeáveis", tais como argilas abaixo da zona de intemperismo				
						Solos "impermeáveis" modificados por efeitos de vegetação e intemperismo							

Fonte: Adaptado de Terzaghi, Peck e Mesri, 1996.

2.5 Requisitos Para o Dimensionamento do Pavimento Permeável

O dimensionamento e a construção do pavimento permeável, independentemente do tipo de revestimento, requerem análises estruturais e hidráulicas que sejam satisfatórias para que o pavimento funcione apropriadamente. Geralmente, para o dimensionamento estrutural é

necessário determinar a dimensão e resistência dos agregados para que suporte as cargas de tráfego e proteja o subleito de deformações permanentes. Para o dimensionamento hidráulico é preciso garantir a quantidade de vazios necessária para armazenar o volume de água que será infiltrada na estrutura, visando evitar a formação de laminas d'água sobre a superfície do pavimento. Um ótimo pavimento permeável é aquele desenvolvido com resistência suficiente para suportar as cargas de tráfego, enquanto mantém a porosidade necessária para garantir a percolação e gestão da água infiltrada (KAYHANIAN *et al.*, 2015).

Para dimensionar pavimentos permeáveis de concreto a NBR 16.416 (ABNT, 2015) especifica as características que devem estar presentes no revestimento e determina parâmetros que devem ser atendidos por as camadas que irão compor o pavimento para o bom desempenho do mesmo.

2.5.1 Dimensionamento Hidráulico

Para o dimensionamento hidráulico a NBR 16.416 (ABNT, 2015) recomenda um levantamento detalhado das condições do solo e precipitação local. Portanto, antes do dimensionamento é necessário que seja definido:

- A permeabilidade do subleito: verificando as condições de permeabilidade do solo natural do local onde o pavimento será instalado por meio de ensaios em laboratório e/ou em campo;
- A precipitação de projeto: que se dá de acordo com equações curvas de intensidade/duração/frequência (IDF) da região;
- Conhecimento das áreas das bacias de contribuição do local.

2.5.2 Dimensionamento Mecânico

Para o dimensionamento mecânico a NBR 16.416 (ABNT, 2015) recomenda que sejam utilizados métodos de acordo com o tipo de revestimento e a condição de saturação do solo. De acordo com Bernucci (2006), no Brasil, utiliza-se principalmente dois parâmetros de caracterização mecânica para o dimensionamento de estruturas de pavimentos: o Índice de Suporte Califórnia (ISC), utilizado no dimensionamento convencional do DNER, e o Módulo de Resiliência (MR), usado na Mecânica dos Pavimentos.

No dimensionamento da camada de revestimento o projeto deve atender no mínimo os valores especificados pela NBR 16.416 (ABNT, 2015), representados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 35,0	ABNT NBR 9.781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 20,0	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 20,0	ABNT NBR 15.805
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 1,0	ABNT NBR 12.142
	Tráfego leve	100,0	≥ 2,0	

Fonte: ABNT NBR 16.416, 2015.

Para o dimensionamento das demais camadas que irão compor o pavimento é necessário que sejam definidos e estudados previamente:

- As condições de carregamento do pavimento: de acordo com o tipo de solicitação;
- A capacidade de suporte do solo;
- O coeficiente de permeabilidade do subleito;
- A condição de saturação do solo (no caso dos sistemas de infiltração total ou parcial);
- As propriedades dos materiais que irão compor a sub-base e/ou base e camada de assentamento: resistência à abrasão, índice de vazios, índice de suporte Califórnia, porcentagem de finos e distribuição granulométrica;
- A avaliação do risco de contaminação do lençol freático.

A capacidade de suporte do solo é determinada por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), ou em inglês, California Bearing Ratio (CBR) (DNIT, 2010a). O ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão em um corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração em uma brita padronizada. O valor dessa relação, expressa em porcentagem, permite determinar, por meio de equações empíricas, a espessura de pavimento flexível necessária, em função do tráfego (DNIT, 2006).

Quando em campo, a determinação do CBR é muito trabalhosa devido à quantidade de equipamentos e tempo necessários para a execução do ensaio, para facilitar e agilizar a obtenção deste fator, é essencial a utilização de correlações entre o CBR e ensaios de campo com procedimentos mais simples que não necessitem de muito tempo para se alcançar o resultado. Por este motivo, em 1956 foi criado o ensaio de penetração dinâmica de cone (DCP) por Scala na Austrália. Com o passar dos anos o ensaio de DCP foi otimizado por outros profissionais como Van Vuuren, em 1960 e Kleyn em 1983, e então normatizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (PAIGE-GREEN; PLESSIS, 2009).

O ensaio de penetração de cone dinâmico (*Dynamic Cone Penetration – DCP*) tem como propósito, determinar a resistência do solo, relacionando seu resultado com o CBR. O ensaio consiste na penetração de um cone de aço padronizado no solo, onde a profundidade e o número de golpes são medidos e seus valores são substituídos em equações que se relacionam com o CBR. Fernandes (2015) afirma que as vantagens do DCP perante o CBR são a simplicidade e baixo custo do equipamento, velocidade de execução do ensaio e a aplicabilidade *in situ* levando em consideração que se trata de um ensaio praticamente não destrutivo.

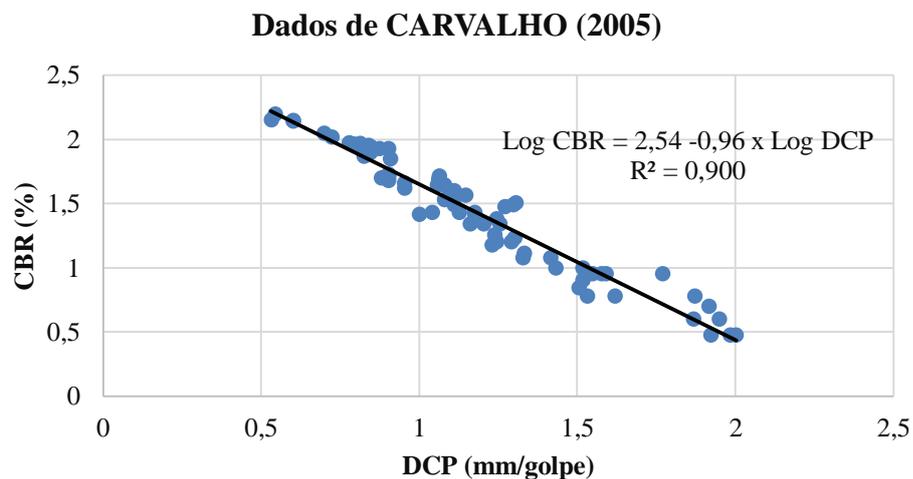
O ensaio DCP é normatizado pela norma internacional ASTM D6951 (2018), que em seu conteúdo sugere algumas correlações entre CBR e DCP representadas na Tabela 8, onde DN é o valor do DCP em mm/golpe.

Tabela 8 – Correlações DCP x CBR sugeridas pela ASTM D6951 (2018)

Tipo de Solo	Correlação	
Todo tipo de solo exceto argilas com baixa e alta plasticidade	$CBR = \frac{292}{DN^{1,12}}$	(eq.1)
Argilas com baixa plasticidade (CBR<10%)	$CBR = \frac{1}{(0,017019 * DN)^2}$	(eq.2)
Argilas altamente plásticas	$CBR = \frac{1}{(0,002871 * DN)}$	(eq.3)

Fonte: ASTM D6951, 2018.

Carvalho (2005), em sua dissertação de mestrado, elaborou correlações entre o ensaio de DCP e CBR realizando ensaios em amostras de solos saprolíticos de textura fina com granulometria variando de arenosa a argilosa nas três energias de compactação. A partir de uma relação com todos os dados obtidos durante sua pesquisa, apresentada no Gráfico 1, Carvalho (2005) obteve a Equação 4, onde o valor de D corresponde ao valor do DCP em mm/golpe.

Gráfico 1 – Correlações DCP x CBR para todos os pontos analisados por Carvalho (2005)

Fonte: Carvalho, 2005.

$$\log CBR = 2,54 - 0,96 * (\log D) \quad R^2 = 0,90 \quad (\text{eq. 4})$$

No entanto, Carvalho (2005) ressalta que no lugar da equação geral, é preferível que se utilize a correlação individual para cada tipo de solo, de acordo com sua classificação, pois ela

possui maior confiabilidade nas estimativas de valor do CBR. As correlações de acordo com o tipo de solo estão listadas na Tabela 9.

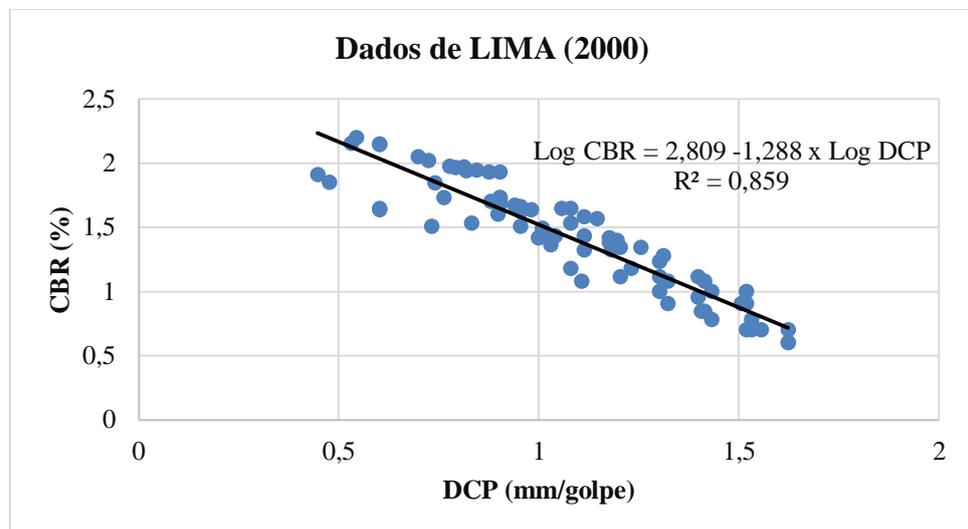
Tabela 9 – Correlações DCP x CBR elaboradas por Carvalho (2005) para solos saprolíticos

Tipo de Solo	Correlação		
Areia silto-argilosa	$\log CBR = 2,87 - 1,12 * (\log D)$	$R^2 = 0,98$	(eq. 5)
Solo micáceo	$\log CBR = 2,65 - 1,12 * (\log D)$	$R^2 = 0,95$	(eq. 6)
Argilo-arenoso	$\log CBR = 2,33 - 0,83 * (\log D)$	$R^2 = 0,96$	(eq. 7)
Argila siltosa	$\log CBR = 2,38 - 0,80 * (\log D)$	$R^2 = 0,96$	(eq. 8)

Fonte: Carvalho, 2005.

Especificamente para solos lateríticos, Lima (2000) elaborou correlações entre o ensaio de DCP e CBR, com corpos de prova compactados nas três diferentes energias de compactação, apresentados no Gráfico 2 e na Tabela 10.

Gráfico 2 – Correlações DCP x CBR para todos os pontos analisados por Lima (2000)



Fonte: Lima, 2000.

Tabela 10 – Correlações DCP x CBR elaboradas por Lima (2000) para solos lateríticos

Tipo de Solo	Correlação		
Terra roxa	$\log CBR = 2,410 - 1,091 * (\log D)$	$R^2 = 0,941$	(eq. 9)
Latosolo amarelo	$\log CBR = 2,980 - 1,436 * (\log D)$	$R^2 = 0,941$	(eq. 10)
Latosolo vermelho amarelo	$\log CBR = 2,966 - 1,335 * (\log D)$	$R^2 = 0,962$	(eq. 11)
Arenoso fino laterítico	$\log CBR = 3,026 - 1,402 * (\log D)$	$R^2 = 0,921$	(eq. 12)
Correlação geral	$\log CBR = 2,809 - 1,288 * (\log D)$	$R^2 = 0,859$	(eq. 13)

Fonte: Lima, 2000.

Outro parâmetro que avalia características mecânicas do solo é o módulo de resiliência. Resiliência é a capacidade que o material possui de retornar à sua forma original após ser submetido a uma solicitação de carga. Os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930. O termo *resiliência* foi adotado por Francis Hveem em 1951, e é definido classicamente como “energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações” (BERNUCCI *et al.*, 2006, p. 291).

Os fatores que influenciam o comportamento do módulo de resiliência do solo são o nível das tensões, a composição granulométrica do solo, o teor de umidade, a densidade e a energia de compactação (VIANA, 2007, p.40). De acordo com Silveira R. (2010) a determinação do módulo de resiliência de solos é realizada em laboratório por meio de ensaios triaxiais de carga repetida. Viana (2007) acrescenta que o módulo de resiliência é uma propriedade mecânica dos solos indispensável para análise estrutural de pavimentos em termos de tensão e deformação quanto às solicitações repetidas de carga.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT a metodologia do módulo de resiliência possibilita analisar e prever estados de tensão-deformação em estruturas de pavimentos através de programas computacionais, a partir de propriedades dinâmicas expressadas em termos de valores de módulo resiliente (DNIT, 2006, p.49). Sendo assim, o módulo de resiliência é determinado com a seguinte equação:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (\text{eq.14})$$

onde:

M_R = módulo de deformação resiliente

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão desvio aplicada repetidamente

σ_1 = tensão axial cíclica

σ_3 = tensão de confinamento

ε_r = deformação recuperável ou resiliente

Para melhor representar o comportamento do módulo de resiliência de acordo com o tipo de material existem alguns modelos de equações que calibram os resultados de módulo de resiliência obtidos por meio do equipamento triaxial.

De acordo com Viana (2007) os modelos utilizados são o de Hicks e Monismith (Modelo A), sigma D (Modelo B), composto ou combinado (Modelo C) e o modelo Universal de Witczak e Uzan (Modelo D), apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Modelos para representação da variação do Módulo de Resiliência com as tensões atuantes no solo

Modelo	Equação do Modelo	
A	$M_R = K_1 * \sigma_3^{K_2}$	(eq.15)
B	$M_R = K_1 * \sigma_d^{K_2}$	(eq.16)
C	$M_R = K_1 * \sigma_3^{K_2} * \sigma_d^{K_3}$	(eq.17)
D	$M_R = Pa * K_1 * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{K_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{K_3}$	(eq.18)

Fonte: Adaptado de Viana, 2007.

onde:

M_R = módulo de deformação resiliente

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = tensão desvio

σ_1 = tensão axial cíclica

σ_3 = tensão de confinamento

K_1, K_2 e K_3 = constantes de regressão do modelo

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ = tensão volumétrica ou primeiro invariante de tensão

P_a = pressão atmosférica

$$\tau_{oct} = \text{ensão cisalhante octaédrica} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{3}} = \sigma_d * \frac{\sqrt{2}}{3}$$

A escolha do modelo varia de acordo com o material, por isso, é necessário avaliar qual ou quais deles apresentam maior valor do coeficiente de determinação (R^2), ou seja, qual representa melhor o material em estudo.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os procedimentos que serão utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Toda 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 se baseou 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 por meio do equipamento DCP.

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

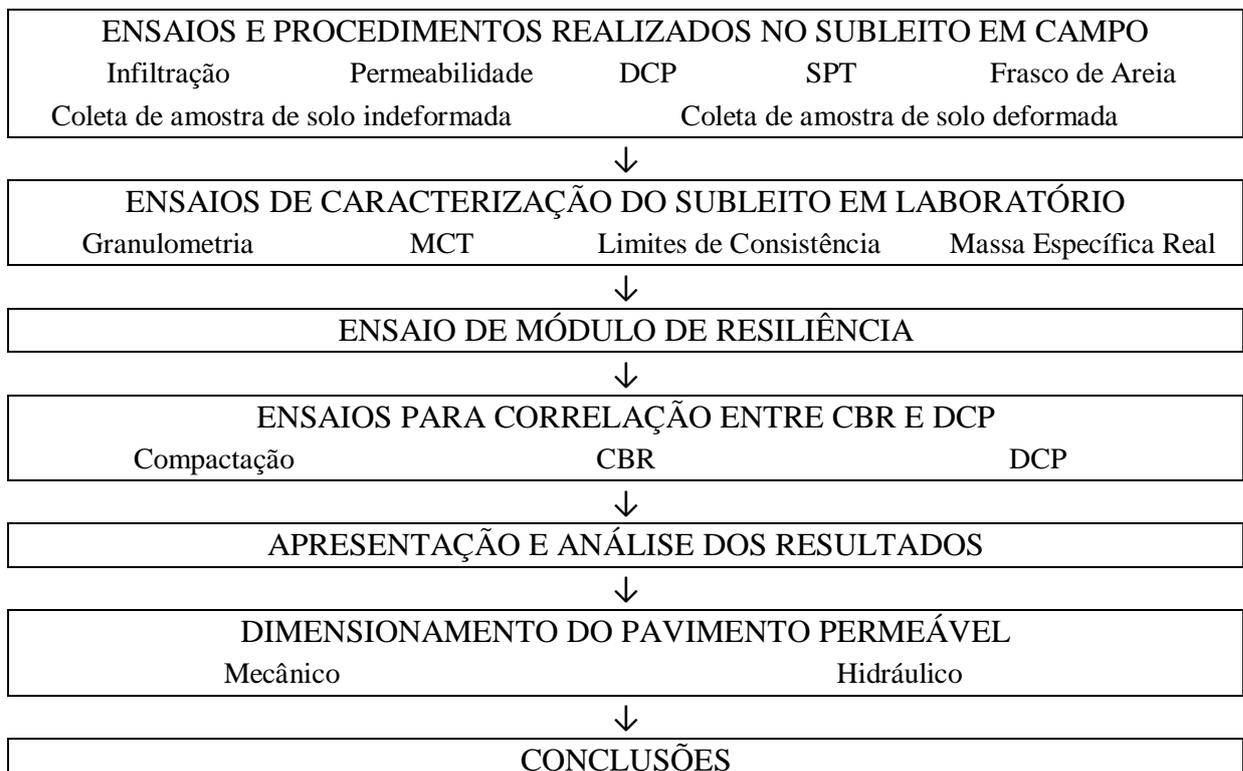
Neste ponto da pesquisa foram apresentados os resultados obtidos a partir da caracterização do subleito, correlações entre CBR e DCP e módulo de resiliência juntamente com suas análises.

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.

O Fluxograma 1 abaixo representa a sequência das etapas que foram seguidas para o desenvolvimento e conclusão da pesquisa.

Fluxograma 1 – Etapas seguidas para desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Desenvolvido pela autora, 2019.

3.1 O Estacionamento e a Localização 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, identificado na Figura 11. A escolha do local se deu devido às condições físicas, por ser utilizado apenas por professores da instituição, não receber muitas solicitações de carga de tráfego, por não haver uma infraestrutura construída, e devido à possibilidade de o pavimento permeável ser implementado futuramente no local.

Figura 11 – Mapa de Brasília apontando a localização do UniCEUB



Fonte: Adaptado de Maps-IOS, 2018.

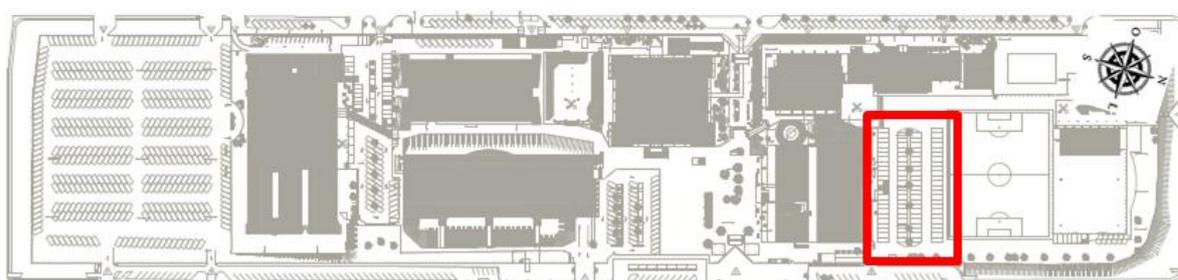
Atualmente o estacionamento é composto por uma camada fina de brita nº 3 sobre solo compactado, possuindo formato retangular de 27,7m x 73,8m com área total de 2.045m², representado na Figura 12. Sua localização dentro do UniCEUB está representada na Figura 13 com a área destacada em vermelho, esta mesma figura está apresentada, em maior escala, no Apêndice A.

Figura 12 – Estacionamento do Bloco 8 do UniCEUB – Asa Norte



Fonte: Acervo da autora, 2019.

Figura 13 – Planta baixa do UniCEUB – Asa Norte com destaque da área do estacionamento



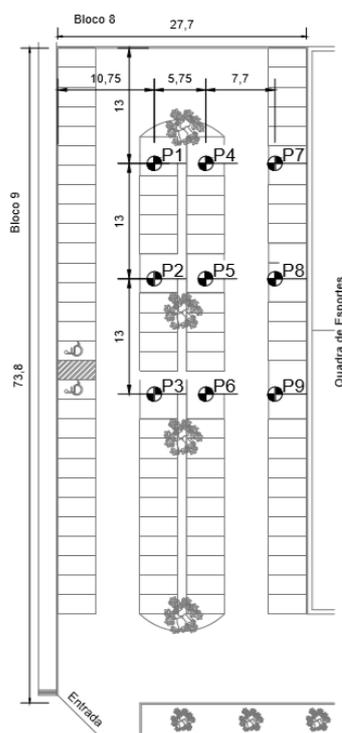
Fonte: Adaptado do Departamento de Arquitetura do UniCEUB.

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 quantidade de pontos de sondagem foi determinada com referência na quantidade de ensaios que devem ser feitos no pavimento executado, para avaliar o desempenho da superfície permeável do pavimento, determinados pela NBR 16.416 (ABNT, 2015). Esta norma recomenda amostra mínima de 06 (seis) pontos de ensaio para lotes de até 2.500m². Desta forma, com a intenção de representar de forma coerente as características do local, decidiu-se majorar esta quantidade para 09 (nove) pontos de inspeção. A locação dos pontos

de sondagem está representada na Figura 14, apresentada no Apêndice B em maiores dimensões. 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 14 – Localização dos pontos de sondagem no estacionamento (P1 ao P9)



Fonte: Adaptado do Departamento de Arquitetura do UniCEUB.

3.2 Subleito - Ensaios e Procedimentos Realizados

Os ensaios descritos neste tópico serão referentes à metodologia dos ensaios elaborados em campo, no subleito, e ensaios executados em laboratório com o solo do subleito.

3.2.1 Ensaios e Procedimentos Realizados em Campo

3.2.1.1 Sondagem SPT

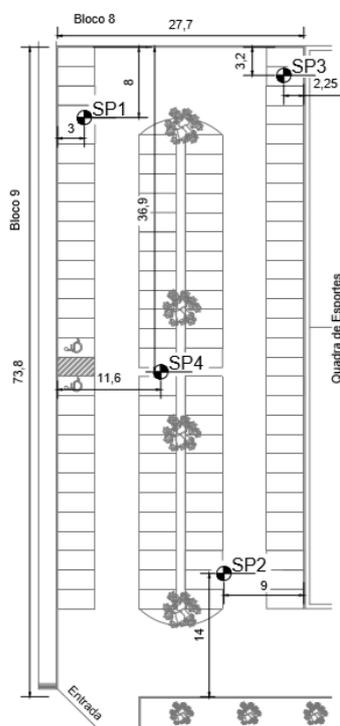
Apesar de não ser um procedimento requerido pela NBR 16.416 (ABNT, 2015), o ensaio de sondagem, normatizado pela NBR 6.484 (ABNT, 2015), consiste basicamente na cravação de um cilindro amostrador, com o auxílio de um martelo padronizado, em posição

vertical no solo, onde é contabilizado o número de golpes necessários para atingir certa profundidade. A quantidade de golpes para penetrar os últimos 30 cm representa o valor da resistência à penetração do solo. De metro em metro as amostras de solo são coletadas para classificação do tipo de solo por método tátil-visual. O ensaio é concluído quando o cilindro alcança o impenetrável, geralmente, é necessário 30 ou mais golpes para perfurar 15 centímetros.

Trata-se de um simples reconhecimento do solo para determinar o tipo do solo em suas respectivas profundidades de ocorrência, a posição do nível d'água e índices de resistência à penetração a cada metro. Ou seja, a finalidade deste ensaio é de proporcionar o reconhecimento do perfil estratigráfico do solo.

No estacionamento em estudo, foram realizados 04 (quatro) sondagens que foram distribuídas na área em estudo, representados na Figura 15, apresentada no Apêndice C em maiores dimensões.

Figura 15 – Localização dos pontos de Sondagem SPT



Fonte: Adaptado do Departamento de Arquitetura do UniCEUB.

3.2.1.2 Permeabilidade do Solo

Para a definição do coeficiente de permeabilidade (taxa de infiltração do solo), a NBR 16.416 (ABNT, 2015), recomenda que sejam feitos procedimentos realizados em laboratório prescritos nas normas NBR 13.292 (ABNT, 1995) e NBR 14.545 (ABNT, 2000). No entanto, para uma melhor avaliação desta característica do solo, foram realizados ensaios *in situ*, uma vez que os valores obtidos representam as condições reais de campo.

A Tabela 12 contém os valores típicos de coeficiente de permeabilidade de acordo com o grau de permeabilidade do solo, definidos pela NBR 16.416 (ABNT, 2015).

Tabela 12 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade

Coeficiente de permeabilidade do solo k		Grau de permeabilidade do solo
m/s	mm/h	
$> 10^{-3}$	> 3.600	alta
10^{-3} a 10^{-5}	3.600 a > 36	média
10^{-5} a 10^{-7}	36 a $> 0,36$	baixa
10^{-7} a 10^{-9}	0,36 a 0,0036	muito baixa
$< 10^{-9}$	$< 0,0036$	praticamente impermeável

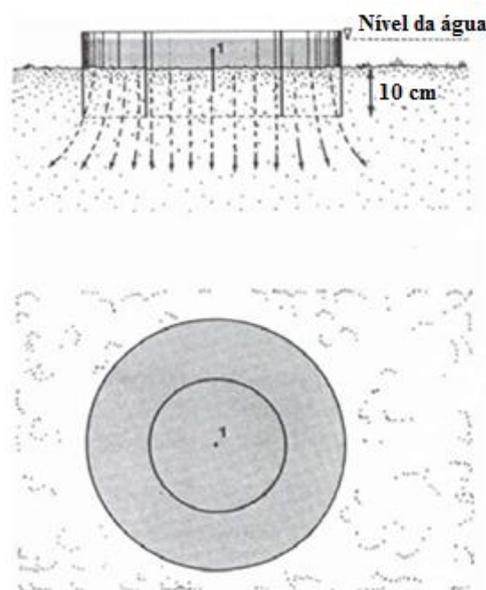
Fonte: ABNT NBR 16.416, 2015.

Os procedimentos realizados *in situ* foram os mesmos que Abreu e Coutinho (2017) utilizaram em sua pesquisa. Sendo assim, os métodos executados foram o de infiltração duplo anel e o método de Porchet, ambos os procedimentos resultam em medidas de permeabilidade, definidas com base no volume de água vertido no solo e quanto tempo essa água leva para infiltrar.

O ensaio de infiltração duplo anel, ou anéis concêntricos, foi realizado com base nas instruções do *Ministerio de Vivienda y Urbanismo* – MINVU (1996). O ensaio tem o objetivo de medir a infiltração vertical da água no solo. O método consiste em cravar no solo dois infiltrômetros cilíndricos, no caso desta pesquisa, um com diâmetro de 25 cm e outro de 50 cm, em uma profundidade de 10 cm (Figura 16). Em seguida, verte-se água em ambos os cilindros, mantendo o mesmo nível de água entre eles. Durante o ensaio são anotadas medições referentes à quantidade de água infiltrada e o tempo que a água leva para infiltrar no

solo. Uma vez que as condições de regime entre o tempo e a taxa de infiltração o ensaio é encerrado.

Figura 16 – Infiltrômetros de cilindros concêntricos



Fonte: Adaptado de MINVU, 1996.

Para calcular o coeficiente de permeabilidade por meio dos dados coletados no ensaio de infiltração duplo anel, deve-se dividir a variação do volume de água pela variação de tempo que a água levou para infiltrar. Assim que o valor da taxa de infiltração se repetir por três vezes consecutivas, este será o valor da taxa de infiltração.

Como descrito anteriormente, este procedimento foi realizado em 09 (nove) pontos do local em estudo. Dado que o terreno se trata de um estacionamento já existente, optou-se realizar o procedimento do duplo anel em uma cota de aproximadamente 40 cm abaixo do nível original do pavimento, uma vez que a superfície do terreno se encontra compactada e não representa as condições naturais do solo local.

Para representar o método de forma mais clara, estão apresentados nas Figuras 17, 18 e 19, os procedimentos do ensaio de infiltração duplo anel. No Apêndice D encontra-se a tabela utilizada para anotação dos dados coletados neste ensaio.

Figura 17 – Cravação dos cilindros no solo em condições naturais



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Figura 18 – Adição de água dentro dos cilindros



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

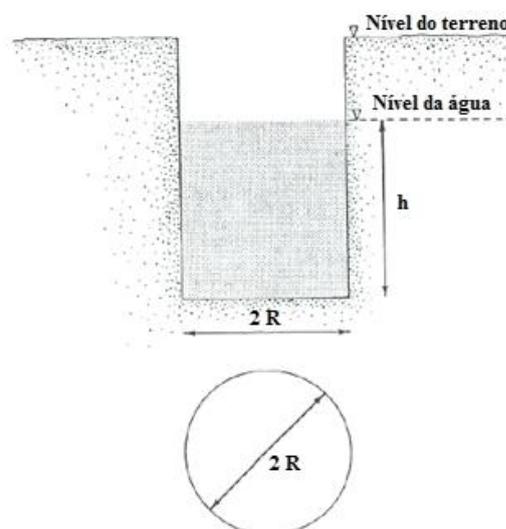
Figura 19 – Coleta de dados – Leitura do nível da água



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Já o ensaio de Permeabilidade de Porchet, também especificado pelo MINVU (1996), consiste na escavação de um poço cilíndrico no solo para que a permeabilidade global seja medida. O procedimento deste ensaio consiste em escavar um poço onde as dimensões sejam compatíveis com a profundidade da obra/pavimento, e em seguida adiciona-se água de forma que preencha a área do cilindro (Figura 20). Mede-se respectivamente o tempo e a quantidade de água que está sendo infiltrada no solo.

Figura 20 – Infiltrômetro de cilindro escavado – Porchet



Fonte: Adaptado de MINVU, 1996.

A permeabilidade do solo, por meio do método de Porchet, é calculada por meio da seguinte equação:

$$f = \frac{R}{2 \cdot \Delta t} * \ln \left(\frac{2 \cdot h_1 + R}{2 \cdot h_2 + R} \right) \quad (\text{eq. 19})$$

Onde:

f = permeabilidade do solo (cm/s)

R = raio do furo escavado (cm)

Δt = intervalo de tempo cronometrado em (s)

h_1 = altura inicial do nível da água dentro do furo (cm)

h_2 = altura final do nível da água dentro do furo (cm)

Este ensaio foi realizado na mesma cava que o ensaio de duplo anel em todos os 09 (nove) pontos de inspeção, logo após o ensaio de DCP. Foi escavado um cilindro com 30 cm de diâmetro e 70 cm de profundidade, representado na Figura 21. O solo retirado durante a escavação foi coletado para ensaios de caracterização em laboratório. Na Figura 22 está representado o ensaio de permeabilidade de Porchet em andamento, com o cilindro ainda cheio de água. No Apêndice E encontra-se a tabela utilizada para anotação dos dados coletados deste ensaio.

Figura 21 – Furo cilíndrico com 30 cm de diâmetro e 70 cm de profundidade para ensaio de permeabilidade de Porchet



Figura 22 – Ensaio de permeabilidade de Porchet em andamento

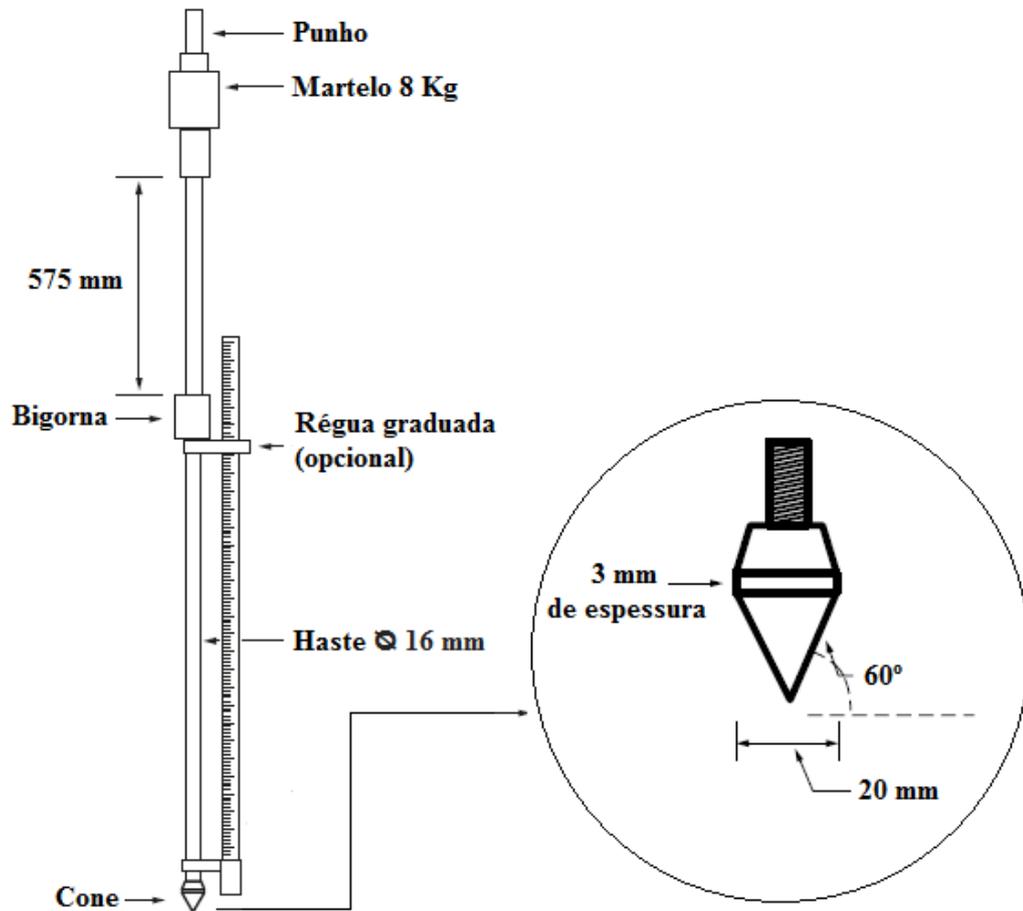


Fonte: Acervo da Autora, 2019.

3.2.1.3 *Dynamic Cone Penetration – DCP*

Normatizado por uma norma internacional, ASTM D6951 (2018), o ensaio de penetração dinâmica de cone consiste na penetração de um cone padronizado por um martelo de 8 Kg no solo ou outro tipo de material compactado. Os valores obtidos com a penetração do cone no solo são correlacionados como a resistência definida com o ensaio CBR por meio de equações apropriadas de acordo com o tipo do solo. Além disso, é importante que a umidade e a densidade do solo, onde o ensaio foi executado, sejam identificadas. O esquema da estrutura do equipamento para a execução do DCP está representado na Figura 23.

Figura 23 – Esquema da estrutura do equipamento DCP



Fonte: Adaptado de ASTM D6951, 2018.

Para realizar o ensaio de DCP o operador do equipamento deve apoiá-lo no solo, segurando no punho e então soltar o martelo de 8 Kg. A penetração, juntamente com o número de golpes devem ser anotados e calculados o índice DCP em centímetros por golpe (cm/golpe), ao ser correlacionado com equações adequadas, este valor é utilizado para avaliar a rigidez do solo local.

O ensaio de DCP foi executado logo após o ensaio infiltração duplo anel, em todos os 09 (nove) pontos, com o objetivo de avaliar o solo em sua pior condição, ou seja, saturado. Para garantir que o equipamento estivesse nivelado foi utilizado um nível de cantoneira em sua haste e as medidas de penetração foram medidas com auxílio de uma trena digital (Figura 24). No final do ensaio, foram coletadas amostras de solo para a verificação do teor de umidade. No Apêndice F encontra-se a tabela utilizada para anotação dos dados coletados durante o ensaio de DCP.

Figura 24 – Execução do ensaio de DCP no campo



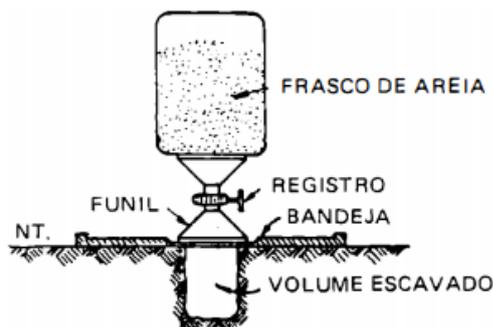
Fonte: Acervo da Autora, 2019.

3.2.1.4 Massa Específica Aparente

A massa específica, peso específico aparente do solo é um parâmetro que mede o grau de concentração de massa em certo volume. Em obras de infraestrutura, a verificação da massa específica é feita para controlar o grau de compactação do solo. Esta característica do solo pode ser obtida em campo por meio do ensaio de frasco de areia.

O ensaio de frasco de areia é normatizado pela NBR 7.185 (ABNT, 2016) e pela norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), DNER-ME 092 (1994), ambas as normas descrevem o mesmo procedimento. Para melhor entendimento, o esquema da disposição dos equipamentos do ensaio está representado na Figura 25 abaixo.

Figura 25 – Disposição dos equipamentos do ensaio Frasco de Areia



Fonte: Caputo, 1988.

Basicamente, para realizar o procedimento do frasco de areia, é necessário escavar um furo cilíndrico no solo com dimensões conhecidas, armazenando o solo retirado do furo em um saco plástico para saber seu peso e a umidade. Em seguida vete-se o frasco, com peso conhecido, no furo para que a areia preencha todo o cilindro. Pesa-se novamente o frasco de areia e a partir da diferença do peso, anota-se o peso do solo que foi removido e umidade, calcula-se então a massa específica aparente *in situ*.

A fim de verificar a massa específica aparente do solo em seu estado natural, na presente pesquisa, o ensaio de frasco de areia foi executado em 5 (cinco) pontos do estacionamento em um poço de sondagem ao lado do local onde os ensaios de permeabilidade e DCP foram executados (Figura 26).

Figura 26 – Ensaio frasco de areia



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

3.2.1.5 Coleta de Amostra Indeformada de Solo para Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência visa verificar a capacidade que o material possui de voltar às suas condições iniciais após sofrer uma deformação por solicitações externas. No Brasil o ensaio de módulo de resiliência é normatizado pela norma do Departamento Nacional DNIT, DNIT-ME 134 (2010b).

Para realizar o ensaio de módulo de resiliência é necessário o preparo de corpos de prova por compactação ou por coleta de amostras indeformadas de solo. No caso desta

pesquisa, para representar as condições naturais de campo, optou-se por coletar amostras indeformadas do subleito em moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento.

Para extrair os corpos de prova foram cravados moldes cilíndricos de ferro com a ponta biselada para facilitar a penetração no solo. A parte interior do cilindro foi lubrificada com vaselina para auxiliar na extração do corpo de prova em futuras etapas. Para fincar o cilindro no solo foram utilizadas uma marreta e uma placa grossa de madeira, para amortecer e distribuir uniformemente o golpe da marreta sobre o cilindro, representado na Figura 27. Conforme o cilindro entrava no solo, o excesso de solo era removido das bordas com o auxílio de uma talhadeira, Figura 28. Devido às características de umidade do solo natural, que estava baixa, houve certa dificuldade em extrair algumas amostras do campo.

Figura 27 – Cravação do cilindro metálico no solo para coleta de amostra indeformada



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Figura 28 – Remoção do solo nas laterais do cilindro

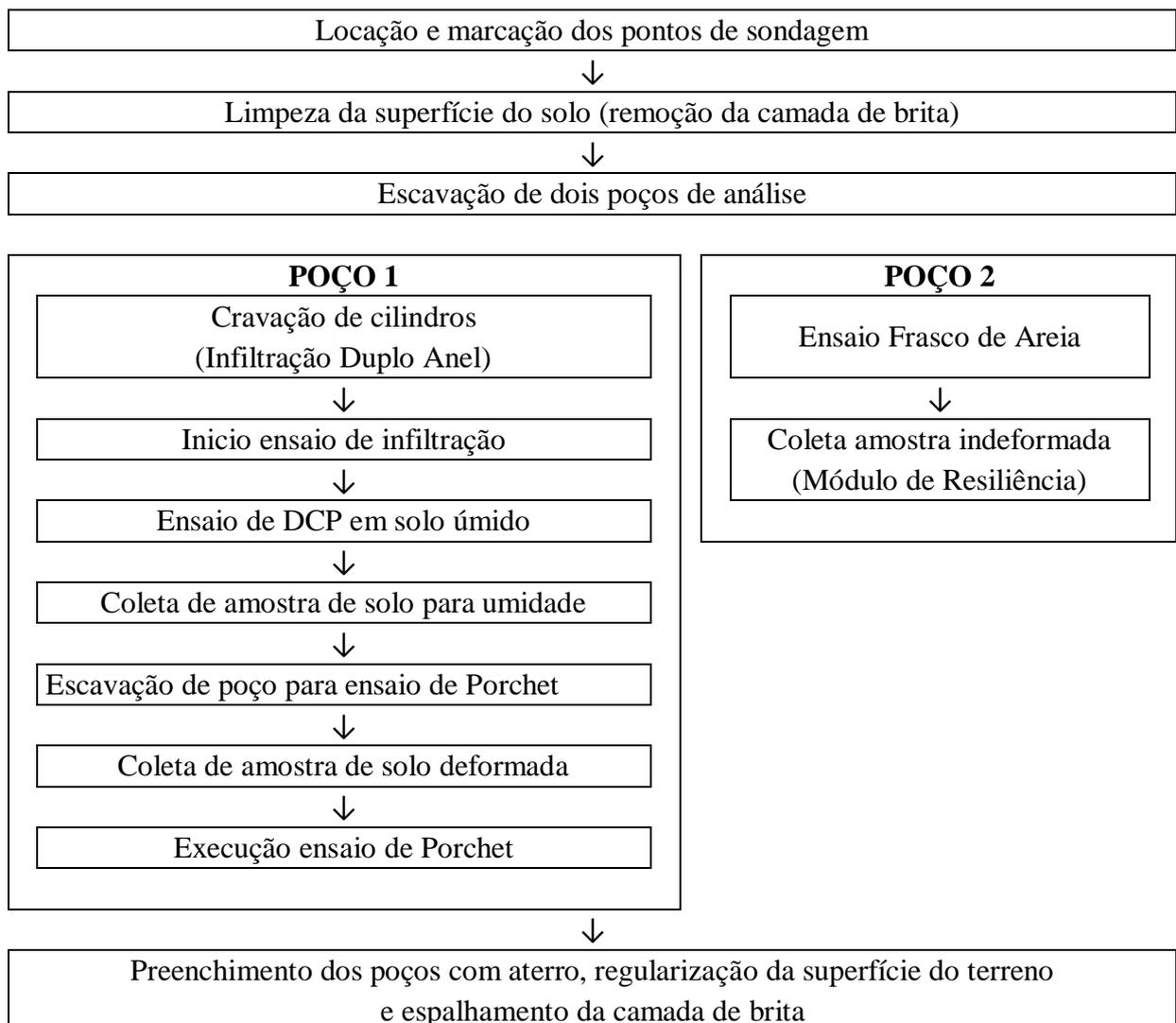


Fonte: Acervo da Autora, 2019.

3.2.2 Logística dos Procedimentos e Ensaios Realizados *In Situ*

Trabalhos realizados em campo são sempre um desafio por se tratar, muitas vezes, de lugares públicos, vulneráveis à intemperes, falta de eletricidade e água, logística de pessoal, entre outros fatores. Como o local do estudo se trata de um estacionamento utilizado por professores e funcionários do Centro Universitário, os experimentos tinham que ser realizados em dias não úteis, como domingos e feriados, e após a realização dos procedimentos o estacionamento precisava ser deixado em condições normais de uso. Para isto, antes de realizar os ensaios em campo foi necessário planejar e esquematizar todos os processos de forma que todas as etapas fossem iniciadas e concluídas no mesmo dia de trabalho. Os procedimentos foram executados de acordo com as etapas descritas no Fluxograma 2 a seguir.

Fluxograma 2 – Etapas seguidas nos procedimentos realizados em campo



Fonte: Desenvolvido pela autora, 2019.

Durante os intervalos de execução dos ensaios de infiltração outros poços eram escavados e os demais ensaios eram executados em sequência. Na Figura 29 está ilustrado a distribuição dos pontos de sondagem durante a realização dos ensaios em campo.

Figura 29 – Execução de ensaios em campo



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Os equipamentos e materiais necessários para a execução dos procedimentos e ensaios realizados *in situ* no subleito estão listados, em formato de *checklist*, no Apêndice G para auxiliar futuras pesquisas.

3.2.3 Caracterização do Solo do Subleito em Laboratório

A classificação geotécnica dos solos é determinada de acordo com suas características de análise granulométrica, limites de liquidez e plasticidade, massa específica, entre outros.

Uma vez com suas características definidas, é possível classificar o solo com base em classificações geotécnicas como, por exemplo, a *Transportation Research Board* – TRB, específica para solos com finalidades rodoviárias, representado no Quadro 4, e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS, representado no Quadro 5.

Quadro 4 – Classificação dos solos - TRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Quadro 5 – Classificação dos solos - SUCS

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.	
		Pedregulho com finos	GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.	
		Areias sem finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e silte.	
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped. areia e argila.	
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.	
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.	
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.	
	SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com LL ≤ 50		ML	Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.
				CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
OL			Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.		
MH			Siltos - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.		
SILTES e ARGILAS com LL > 50			CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
			OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
Solos Altamente Orgânicos			PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.	

Para a classificação do solo do subleito, optou-se por avaliar amostras deformadas de solo de todos os 09 (nove) pontos de sondagem de modo a obter uma maior dispersão de dados e classificar o solo com maior precisão. Antes de realizar os ensaios de caracterização todas as amostras de solo foram preparadas de acordo com as recomendações da NBR 6.457 (ABNT, 2016), com os seguintes procedimentos: secagem prévia, destorroamento dos grãos (Figura 30), peneiramento, verificação da umidade e armazenamento em sacos plásticos.

Figura 30 – Preparação do solo para ensaios de caracterização – Destorroamento e peneiramento do solo



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Os ensaios caracterização realizados foram os seguintes:

3.2.3.1 Ensaio de Granulometria

De acordo com a NBR 6.502 (ABNT, 1995), sobre definições de termos relativos a materiais da crosta terrestre para fins de engenharia geotécnica, a classificação granulométrica dos solos é definida de acordo com as dimensões dos grãos ou partículas do solo, e suas diferentes porcentagens de ocorrência.

Sendo assim, na presente pesquisa, os ensaios de granulometria foram realizados nas 9 (nove) amostras de solo. Os ensaios foram realizados com e sem defloculante. O defloculante é uma solução de hexametáfosfato de sódio utilizado no ensaio de granulometria com o intuito de desagregar as partículas finas do solo.

O ensaio de granulometria, normatizado pela NBR 7.181 (ABNT, 1984) ou pela DNER-ME 051 (1994), tem a duração de 04 dias, e seu procedimento consiste basicamente nos seguintes passos: verter 125 ml de defloculante em 70 g de solo deixando descansar por no mínimo 12 horas. Após o descanso, a mistura é colocada em um dispersor, representado na Figura 31, durante 15 minutos para total desagregação das partículas do solo.

Em seguida a mistura é colocada em uma proveta com capacidade de 1 litro, onde o volume da proveta é preenchido com água destilada. O solo dentro da proveta é agitado com um agitador padronizado durante 60 segundos e então é dado início na leitura da sedimentação do material com o auxílio de um densímetro (Figura 32).

Figura 31 – Dispersor de solos



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Figura 32 – Sedimentação de 03 amostras de solo (Com Defloculante)



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

As leituras de sedimentação são feitas durante o período de 24 horas a partir da primeira leitura. Após este processo lava-se o material dentro na peneira de número 200 para remover toda argila contida na amostra. A parte retida na peneira é colocada em uma cápsula para secar na estufa durante pelo menos 16 horas. Após seco, o material é peneirado no seguinte jogo de peneiras: #16, #30, #40, #60, #100 e #200, representadas na Figura 33, durante o período de 05 minutos.

Deve-se pesar e anotar a quantidade de material retido em cada peneira (Figura 34). A partir deste procedimento é possível traçar a curva granulométrica do solo e definir a porcentagem dos seus componentes.

Figura 33 – Jogo de peneiras



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Figura 34 – Material retido



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Para o ensaio de granulometria sem defloculante, representado na Figura 35, são seguidos basicamente os mesmos passos do ensaio com defloculante, trocando o defloculante por água destilada e não havendo necessidade de colocar o solo no dispersor. Este procedimento, sem defloculante, é realizado, geralmente, para avaliar as dimensões naturais, ou seja, as condições que o material se encontra em campo.

Figura 35 – Sedimentação em duas amostras de solo (Sem Defloculante)



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

3.2.3.2 Massa Específica Real- G_s

Todos os tipos de solo, em condições normais, possuem água e ar em seu interior. O ensaio de massa específica real (G_s) serve para avaliar a massa específica do solo sem considerar a água e o ar presente entre seus grãos. A obtenção do valor de G_s é necessária também para os cálculos do ensaio de sedimentação e a determinação do índice de vazios presentes no solo.

As instruções e recomendações sobre como obter a massa específica real dos solos estão normatizados na NBR 6.458 (ABNT, 2017) ou na DNER-ME 093 (1994). O procedimento consiste basicamente em adicionar água destilada em uma capsula contendo 50g de solo e deixando descansar por, no mínimo, 12 horas. Em seguida o material deve ser agitado com auxílio de dispersores durante o período de 15 minutos (Figura 36).

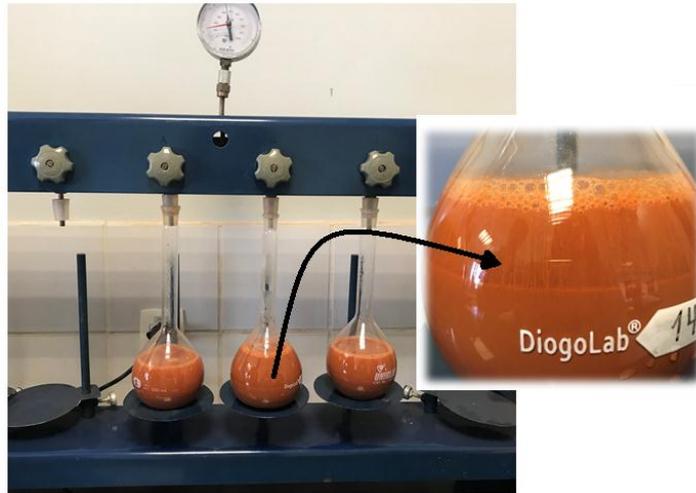
Figura 36 – Dispersores de solo utilizados para agitar as amostras



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Após a agitação o material é transferido para balões volumétricos, preenchendo o volume do balão com água destilada até a metade. Aplica-se vácuo nos balões durante 15 minutos para remover o ar do solo, este procedimento está representado na Figura 37 onde é possível ver a ascensão do ar.

Figura 37 – Aplicação de vácuo nos balões volumétricos contendo amostra de solo



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Após este processo, é adicionado água destilada no balão até cerca de 1 cm antes da linha do menisco e então o balão volumétrico é colocado em banho maria durante cerca de 30 minutos. Deve-se esperar que o material resfrie completamente, até chegar na temperatura ambiente por cerca de 12 horas (Figura 38), e então é adicionado água destilada novamente até a linha do menisco. Neste momento a temperatura e o peso do balão volumétrico são medidos e anotados. Este ensaio deve ser realizado pelo menos duas vezes para se obter um valor médio. Na presente pesquisa, para cada amostra de solo, o ensaio de massa específica real dos grãos foi feito 03 (três) vezes.

Figura 38 – Balões volumétricos após resfriamento



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

3.2.3.3 Limites de Atterberg – Liquidez e Plasticidade

Todos os tipos de solo possuem uma consistência que varia de acordo com seu teor de umidade, podendo ser nos estados sólido, semi-sólido, plástico ou líquido. De acordo com Das (2007), o teor de umidade no ponto de transição do estado semi-sólido para o plástico é denominado como o *limite de plasticidade* e do estado plástico para o estado líquido é o *limite de liquidez*, estes são conhecidos como os Limites de Atterberg.

O conhecimento dos valores dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) de solos é de extrema importância para classificar o solo, uma vez que são utilizados para calcular o índice de plasticidade (IP), parâmetro de referência em sistemas de classificação geotécnica de solos. O índice de plasticidade é determinado de acordo com a Equação 20, abaixo.

$$IP = LL - LP \quad (\text{eq. 20})$$

Os limites de liquidez e o de plasticidade são determinados por meio de ensaios em laboratório e seus procedimentos são descritos em normas distintas.

O limite de liquidez é normatizado pela NBR 6.459 (ABNT, 2016) ou pela DNER-ME 122 (1994). Para realizar este ensaio primeiramente deve-se homogeneizar o solo. O processo de homogeneização consiste em adicionar uma pequena quantidade de água destilada no solo e seguir amassando e revolvendo o solo até se obter uma pasta homogênea, este processo pode durar entre 15 a 30 minutos. Os equipamentos e ferramentas utilizados neste ensaio estão representados na Figura 39.

Figura 39 – Equipamentos utilizados no ensaio de Limite de Liquidez

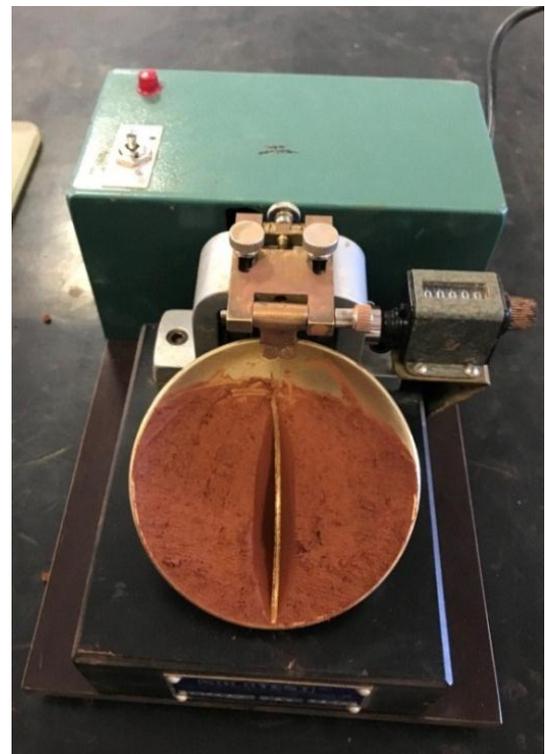


Em seguida, a amostra de solo é colocada no aparelho de Casagrande, representado na Figura 40, de forma que preencha pouco mais da metade da concha do equipamento. Com o auxílio de um cinzel, em posição perpendicular à superfície da concha, faz-se uma ranhura no solo em sua parte central (Figura 41). A partir daí liga-se o aparelho, que por sua vez golpeia a concha em sua base, em queda livre, até que a ranhura se feche e o solo fique unido. Coleta-se parte do solo na parte de “união” para determinação de sua umidade.

Figura 40 – Equipamento de Casa Grande com solo



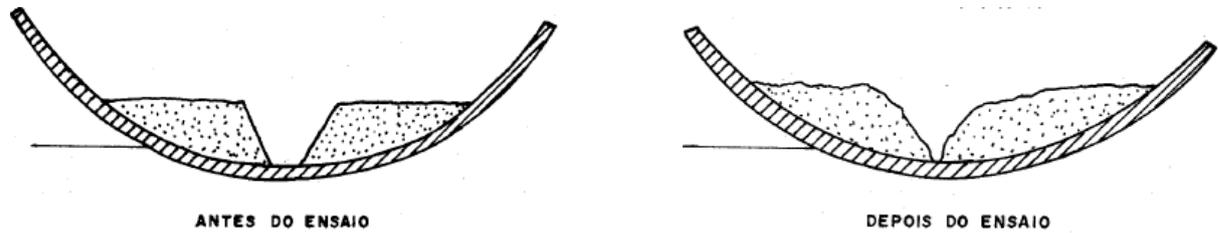
Figura 41 – Ranhura



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Na Figura 42 está representado como o solo deve ficar antes e depois do ensaio. Este procedimento é repetido algumas vezes de forma que se obtenham umidades distintas para a seguinte quantidade de golpes: 35, 30, 25, 20 e 15, podendo variar mais ou menos 1 golpe. Isto é feito para que se obtenha uma reta que relaciona a umidade com a quantidade de golpes. O valor do limite de liquidez é o valor da umidade na reta que corresponda a 25 golpes.

Figura 42 – Situação da massa de solo antes e depois dos golpes



Fonte: DNER – ME 122, 1994.

Já o limite de plasticidade é normatizado pela NBR 7.180 (ABNT, 2016) ou pela DNER-ME 082 (1994). A metodologia para iniciar este ensaio se inicia com o mesmo processo de homogeneização do solo descrito no ensaio de limite de liquidez. Após esta etapa é retirada cerca de 10 g de solo, faz-se uma pequena bola, que deve ser rolada sobre uma placa de vidro com superfície esmerilhada, com a mão, até que um cilindro de aproximadamente 3 mm se forme (Figura 43).

Figura 43 – Formação do cilindro para ensaio de limite de plasticidade do solo



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Caso a amostra quebre antes de atingir os 3 mm, deve-se adicionar mais água destilada na amostra e homogeneizar o solo novamente. Se a amostra atingir os 3 mm sem se fragmentar, deve-se secar um pouco a amostra de solo até que ele se fragmente com o diâmetro de 3 mm e comprimento de 100 mm. Imediatamente, após o cilindro formado nas condições ideais, deve-se transferir suas partes para que o teor de umidade seja verificado. Este procedimento deve ser repetido três vezes para que se obtenha um valor médio de umidade, que será o valor do limite de plasticidade. Na Figura 44 estão representadas as

amostras coletadas do ensaio de limite de liquidez e plasticidade para verificação do teor de umidade.

Figura 44 – Amostras retiradas dos ensaio de limite de liquidez e plasticidade para verificação do teor de umidade do solo

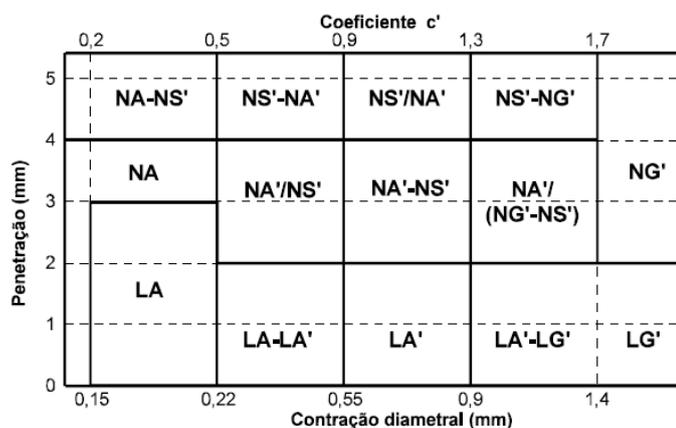


Fonte: Acervo da Autora, 2019.

3.2.3.4 MCT- Método das Pastilhas

O método das pastilhas serve para classificar especificamente solos tropicais e visa substituir a tradicional metodologia MCT tradicional (Miniatura, Compactado, Tropical) por um procedimento expedito táctil- visual. Ambos os métodos foram criados por Nogami e Villibor (Fortes, Merighi e Zuppollini, 2002). Na metodologia MCT do método das pastilhas o solo é classificado de acordo com os parâmetros representados na Figura 45.

Figura 45 – Classificação do método das pastilhas



Fonte: Nogami e Villibor, 1994, *apud* Fortes, Merighi e Zuppollini, 2002.

O procedimento para realizar este ensaio consiste primeiramente em homogeneizar o solo do mesmo modo realizado nos limites de Atterberg. Em seguida, com uma parte do solo deve-se preencher 3 moldes em formato de anéis, previamente lubrificadas com vaselina, formando pastilhas de solo devem secar durante 24 horas (Figura 46).

Figura 46 – Amostras de solo moldadas para ensaio de MCT Método das Pastilhas



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Após esse período, deve-se medir tanto os anéis quanto as pastilhas para verificar a contração diametral do solo. Em seguida as pastilhas são colocadas sobre uma pedra porosa coberta com papel filtro, em um recipiente contendo água, mas apenas para cobrir parte da pedra porosa, no intuito de avaliar a absorção de água pelo solo moldado nas pastilhas. Esta etapa está representada na Figura 47.

O tempo que a água leva para saturar as pastilhas deve ser anotado. Duas horas após a saturação do solo, é feito o teste de penetração com um penetrômetro normatizado em cada pastilha, representado na Figura 48, anota-se a penetração. Ao final é necessário observar algumas peculiaridades do solo, como eventuais rachaduras ou aumento de volume. Com os valores obtidos ao final destes procedimentos é possível classificar o solo.

Figura 47 – Pastilhas de solo colocadas



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Figura 48 – Teste de penetração nas pastilhas



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

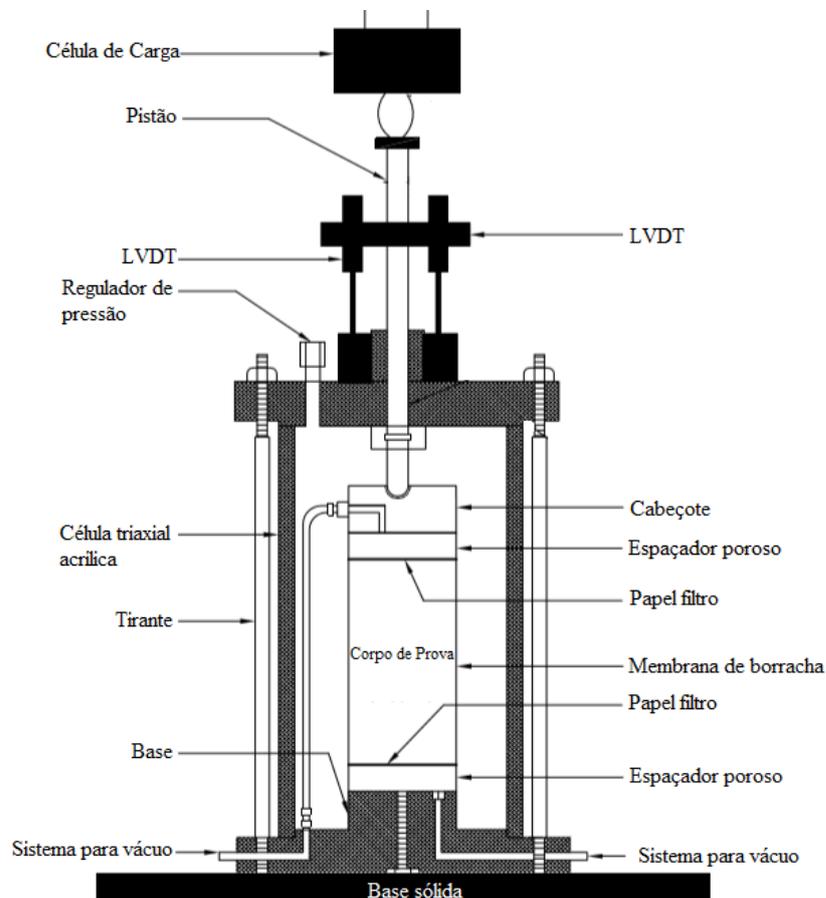
Com a outra parte de solo homogeneizada deve-se fazer 3 bolinhas com 10 a 12 gramas e deixar secar durante 24 horas. Após esse período é necessário pesar novamente as bolinhas e realizar o procedimento de esmagamento que consiste em esmagar as bolinhas com a pressão dos dedos da mão, para avaliar sua resistência ao esmagamento. Este segundo procedimento é realizado apenas para verificar a umidade e a resistência ao esmagamento.

3.3 Módulo de Resiliência do solo

O método de ensaio que determina o módulo de resiliência dos solos é definido pela norma do DNIT 134 (2010b) e pela AASHTO T 307 (1999). Para a realização do ensaio são necessárias amostras de solo em formato cilíndrico que podem ser moldadas por meio de ensaios de compactação ou por amostras indeformadas de solo.

Na intenção de avaliar as condições naturais de campo, optou-se por extrair os corpos de prova diretamente do local em estudo. Em campo, as amostras indeformadas foram extraídas dentro de cilindros metálicos, para que pudessem ser desmoldadas no laboratório e então iniciar o ensaio que determina o módulo de resiliência. Porém, durante o desmolde alguns corpos de prova romperam ou entortaram, restando poucas amostras para determinar o módulo de resiliência. O equipamento utilizado para realizar o ensaio do módulo de resiliência é o Triaxial de Carga Repetida, representado na Figura 49.

Figura 49 – Equipamento triaxial de carga repetida



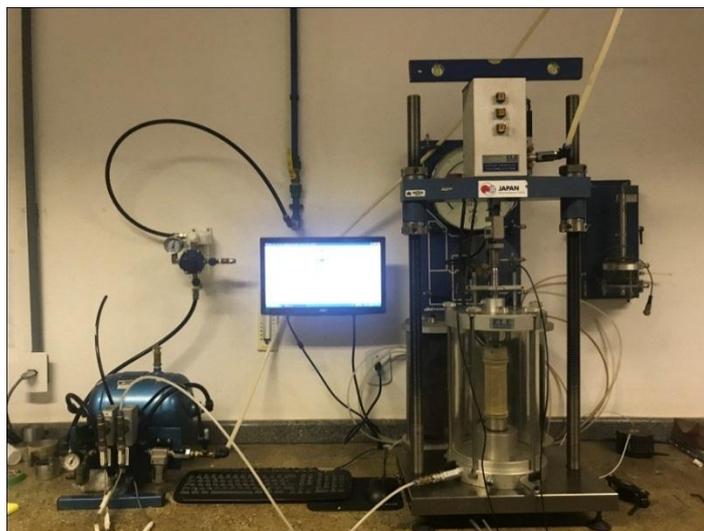
De modo geral, para realizar o ensaio, primeiramente deve-se preparar o corpo de prova, envolvendo-o com uma membrana de borracha. Após esta etapa o corpo de prova é colocado no equipamento, Figura 50.

Figura 50 – Corpo de prova com membrana plástica na base do triaxial



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Em seguida a célula triaxial (cilindro de acrílico) é encaixada no equipamento, os leitores LVDTs são ajustados na parte externa da célula triaxial, e então é dado início no ensaio (Figura 51). O ensaio consiste em aplicar no corpo de prova pares de tensões, confinantes e axiais, para avaliar a resiliência do material. Essas tensões possuem o objetivo de proporcionar ao solo, condições normais de uso, simulando a carga de rolamento de veículos no pavimento e avaliando a capacidade resiliente do material. Ao final da aplicação das tensões, por meio de sistema computacional, são obtidos os valores das tensões e o módulo de resiliência.

Figura 51 – Equipamento Triaxial pronto para iniciar o ensaio

Fonte: Acervo da Autora, 2019.

No caso de estudo do subleito, a AASHTO T 307 (1999) recomenda que sejam aplicados os pares de tensões apresentados na Tabela 13 para os ensaios triaxiais cíclicos.

Tabela 13 – Sequências de tensões para determinação do Módulo de Resiliência para solo do subleito

Sequência	Tensão de confinamento	Tensão máxima	Tensão desvio	Tensão de contato	Números de aplicações de carga
n.º	σ_3 (kPa)	σ_a (kPa)	σ_d (kPa)	σ_c (kPa)	
0	41,4	27,6	24,8	2,8	500-1000
1	41,4	13,8	12,4	104,0	100
2	41,4	27,6	24,8	2,8	100
3	41,4	41,4	37,3	4,1	100
4	41,4	55,2	49,7	5,5	100
5	41,4	68,9	62,0	6,9	100
6	27,6	13,8	12,4	1,4	100
7	27,6	27,6	24,8	2,8	100
8	27,6	41,4	37,3	4,1	100
9	27,6	55,2	49,7	5,5	100
10	27,6	68,9	62,0	6,9	100
11	13,8	13,8	12,4	1,4	100
12	13,8	27,6	24,8	2,8	100
13	13,8	41,4	37,3	4,1	100
14	13,8	55,2	49,7	5,5	100
15	13,8	68,9	62,0	6,9	100

Fonte: AASHTO T 307, 1999.

Figura 53 – Corpos de prova imersos na água



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Após este período o corpo de prova é retirado do tanque e deixa-se escorrer o excesso de água durante o período de 15 minutos, em seguida é realizado o processo de penetração. Este consiste em aplicar no corpo de prova uma carga de aproximadamente 45 Newtons à uma velocidade de 1,27 mm/min, durante um período total de 10 minutos. Para isto o corpo de prova é posicionado e preparado de acordo com as recomendações de norma. Durante a penetração são realizadas leituras em um extensômetro acoplado ao equipamento, representado na Figura 54, este mede a penetração do pistão no solo. A partir destes valores é possível obter o valor do CBR, ou seja, resistência do solo.

Figura 54 – Prensa utilizada para penetração



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Após o ensaio de CBR, com o corpo de prova ainda dentro do molde cilíndrico, foi realizado o ensaio de DCP na superfície oposta a que o ensaio de penetração do CBR foi executado. Na Figura 55 está representado o corpo de prova logo após o ensaio de CBR e ao lado, na Figura 56, o corpo de prova virado ao contrário para a execução do ensaio de DCP.

Para impedir que a ponta do cone do DCP fosse danificada utilizou-se, sobre o disco espaçador, algumas camadas de manta emborrachada para amortecer o golpe caso este penetrasse todo o corpo de prova e batesse direto no disco espaçador. Nas Figuras 57 e 58 estão representados as disposições dos materiais para garantir a proteção da ponta do cone.

Figura 55 – Superfície utilizada para penetração CBR



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Figura 56 – Superfície utilizada para o DCP



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Figura 57 – Base com disco espaçador com camada de borracha



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Figura 58 – Cilindro encaixado na base pronto para ensaio de DCP



Fonte: Acervo da Autora, 2019.

Após a execução do ensaio de DCP foram coletadas amostras de solo para verificação de sua umidade. Para a realização dos ensaios o solo foi seco ao ar livre e armazenado de acordo com as instruções da NBR 6.457 (ABNT, 2016). A energia utilizada para compactar o solo foi a Proctor Normal, ou seja, 05 camadas de solo com 12 golpes por camada.

No total foram moldados 12 corpos de prova em diferentes teores de umidade para a realização do ensaio de CBR e DCP. Em 06 deles optou-se por não imergir na água durante o período de 04 dias, para avaliar a resistência na umidade de compactação e não na umidade pós imersão na água.

3.5 Camada de Base e Assentamento

Segundo a NBR 16.416 (ABNT, 2015) o material de base deve ser composto por brita com granulometria aberta e deve conter as exigências mínimas prescritas na norma, apresentadas anteriormente na Tabela 3. De acordo com Abreu e Coutinho (2017), para garantir uma granulometria aberta na camada de base, a mistura deve conter 5% de brita nº 02, 65% de brita nº 01 e 30% de pedrisco.

O material da camada de assentamento também deve atender aos requisitos mínimos de norma, apresentados anteriormente na Tabela 1. Como se trata de uma camada de regularização e acomodação das placas, de acordo com Abreu e Coutinho (2017), a camada de assentamento deve ser composta apenas por pedrisco, ou seja, brita nº 00.

3.6 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 59).

Figura 59 – Placa de concreto permeável para revestimento



Os dados de resistência à tração na flexão, obtidos por Abreu e Coutinho (2017) por meio das recomendações da NBR 12.142 (ABNT, 2010) estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão

Corpo de Prova	fct (MPa)
1	6,31
2	4,87
3	4,18
4	5,62
Média = 5,25 MPa	
Desvio = 0,80 MPa	

Fonte: Abreu e Coutinho, 2017.

De acordo com os requisitos da norma NBR 16.416 (ABNT, 2015), descritos na Tabela 7, a placa deve conter resistência maior ou igual a 2,0 MPa. Sendo assim, 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), representados na Tabela 15, o coeficiente de permeabilidade da placa de concreto permeável atende às condições de norma.

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade da placa

Placa	k (m/s)
1	1,45E-03
2	1,09E-03
3	1,53E-03
Média = 1,36E-03	
Desvio = 1,93E-04	

Fonte: Abreu e Coutinho, 2017.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante a pesquisa juntamente com suas respectivas análises.

Como os experimentos foram realizados em vários pontos do mesmo local, optou-se por selecionar e apresentar neste capítulo apenas os valores que melhor representassem o todo. Sendo assim, como critério de seleção de dados, utilizou-se o método dos quartis o qual consiste em calcular limites superiores e inferiores para uma dada amostra de dados e os valores discrepantes, que ultrapassarem qualquer um desses limites, são desconsiderados.

Todos os dados e resultados coletados durante esta pesquisa estão disponíveis nos apêndices deste trabalho.

4.1 Perfil Estratigráfico do Solo

Por meio das sondagens SPT e dos ensaios de caracterização foi possível elaborar o perfil estratigráfico do solo, representando na Figura 60 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 60 – 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	4	7	8	1	2	2	1	2	2			
	15			15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15		
-2,00				1	3	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1			
	15			15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15		
-3,00				3	3	4	2	2	2	1	2	1	1	2	2			
	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15				
-4,00		2	3	4	2	3	3	3	3	4	2	2	2					
	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15				
-5,00		3	4	3	1	2	3	3	4	5	1	2	1					
	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15				
-6,00	-5,90		Areia, pouco argilosa, pouco siltosa, vermelha, seca	3	3	2	2	1	2	4	4	5	3	3	4			
	15			15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15		
-7,00				2	4	5	3	4	5	4	5	3	4	4	4			
	15			15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15		
-8,00																		

Fonte: Acervo da Autora, 2019.

4.2 Caracterização do Solo do Subleito

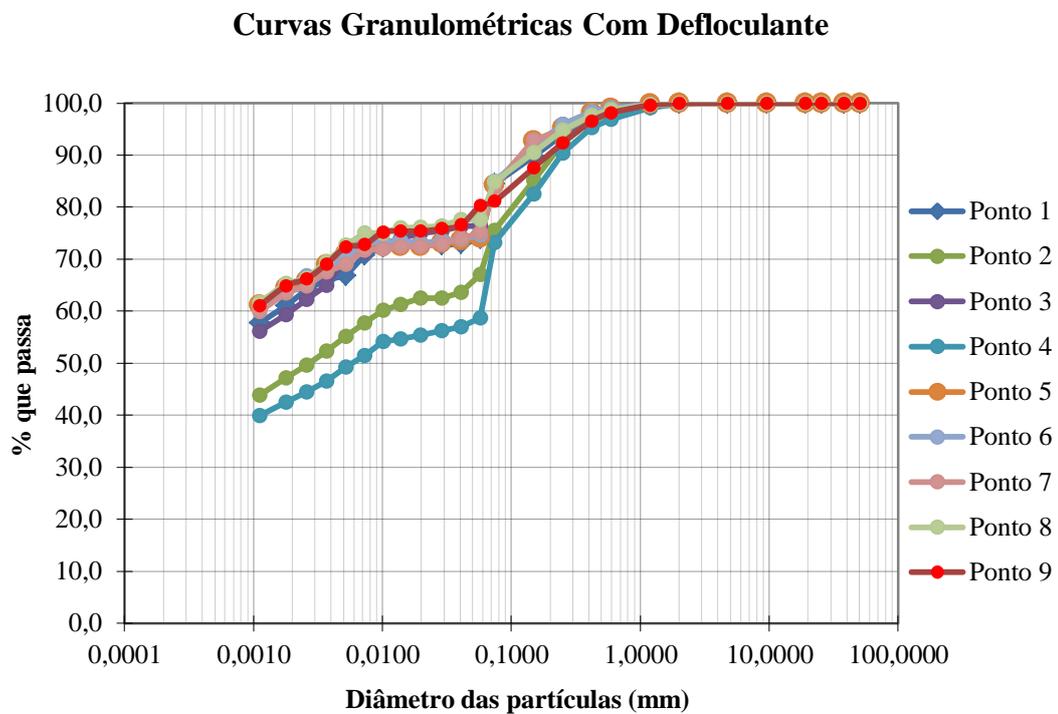
4.2.1 Granulometria

Os resultados dos ensaios de granulometria estão representados nas curvas granulométricas apresentadas no Gráfico 3, com defloculante, e no Gráfico 4, sem defloculante.

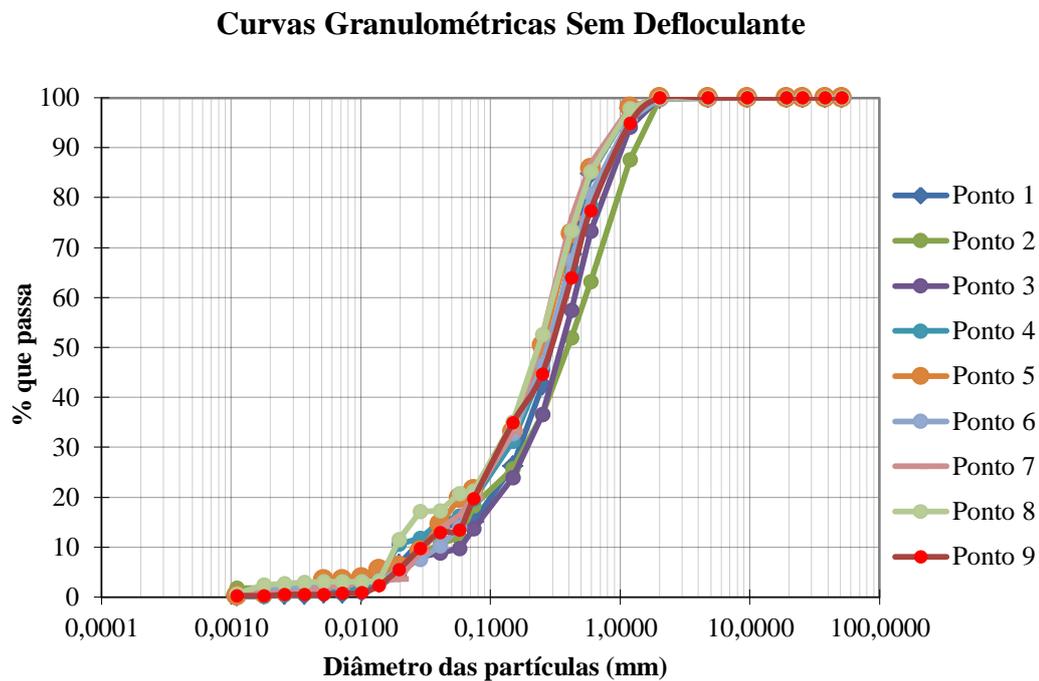
Nota-se grande diferença entre as amostras com e sem defloculante, onde as distribuições da amostra com defloculante apresentaram cerca de 60% do solo passando pela peneira #200 (0,075 mm), neste caso o solo seria classificando como argiloso. Por outro lado, nas amostras sem defloculante a distribuição granulométrica é mais uniforme apresentando a maioria de suas partículas com tamanhos similares, tratando-se de uma areia fina.

Esta diferença é muito comum em solos da região Centro Oeste do Brasil, que desagregam com o uso do defloculante. As curvas granulométricas e as diferenças encontradas entre os ensaios com e sem defloculante estão de acordo com as pesquisas de Mota (2003) e Guimarães (2002) que também classificaram o solo da região. Estes autores ressaltam que a classificação final do solo deve ser feita com base nos ensaios de granulometria sem o uso do defloculante, uma vez que a distribuição granulométrica representa a composição real do solo.

Gráfico 3 – Curvas granulométricas do solo do subleito com defloculante



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Gráfico 4 – Curvas granulométricas do solo do subleito sem defloculante

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Os ensaios de granulometria foram realizados com o solo coletado nos 9 pontos de sondagem. As porcentagens do material passante, de acordo com a malha da peneira, estão apresentadas no Apêndice H para cada um dos pontos ensaiados.

4.2.2 Massa específica real – Gs

Os valores de massa específica real de cada amostra de solo do local estudado estão apresentados na Tabela 16, os dados coletados para a obtenção dos valores de massa específica real estão apresentados no Apêndice I. Realizando uma média entre todos os valores tem-se que a massa específica real dos grãos do solo é de 2,72 g/cm³.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de massa específica real - Gs

Ponto 1 2,70	Ponto 2 2,64	Ponto 3 2,61
Ponto 4 2,75	Ponto 5 2,70	Ponto 6 2,81
Ponto 7 2,75	Ponto 8 2,67	Ponto 9 2,81
Média		2,72
Valores em g/cm ³		

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

4.2.3 Limites de Atterberg

Os resultados dos limites de liquidez e plasticidade estão apresentados na Tabela 17 juntamente com os respectivos valores de índice de plasticidade.

Tabela 17 – 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
Média	48,89	35,19	13,70

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

O índice de plasticidade é um parâmetro fundamental na classificação dos solos. De forma qualitativa, o índice de plasticidade se classifica de acordo com as descrições da Tabela 18.

Tabela 18 – Classificação qualitativa do índice de plasticidade dos solos

IP	Descrição
0	Não-plástico
1 - 5	Ligeiramente plástico
5 - 10	Plasticidade baixa
10 - 20	Plasticidade média
20 - 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

Fonte: Das, 2007.

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.

4.2.4 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 19.

Tabela 19 – 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
Média	0,65	1,43	38,32

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

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.

4.2.5 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. De acordo com o Manual de pavimentação do DNIT (2006, p.37) o índice de grupo é calculado de acordo com a Equação 21.

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad (\text{eq. 21})$$

onde:

IG = índice de grupo

a = % de material que passa na peneira #200, menos 35. Se a % obtida nesta diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35. (a varia de 0 a 40)

b = % de material que passa na peneira #200, menos 15. Se a % obtida nesta diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15. (b varia de 0 a 40)

c = valor do limite de liquidez menos 40. Se o limite de liquidez for maior que 60, adota-se 60; se for menor que 40, adota-se 40 (c varia de 0 a 20)

d = valor do índice de plasticidade menos 10. Se o índice de plasticidade for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10 (d varia de 0 a 20)

Os valores de índice de grupo juntamente com a classificação TRB e SUCS estão apresentados na Tabela 20 representando as amostras ensaiadas com defloculante e na Tabela 21, representando as amostras ensaiadas sem o uso do defloculante.

Tabela 20 – Valores de índice de grupo do solo ensaiado com uso de defloculante e classificações TRB e SUCS

Ponto	Índice de Grupo IG COM Defl.	Classificação	
		TRB	SUCS
P1	18,23	A-7-5	MH
P2	0,00	A-5	ML
P3	17,34	A-7-5	ML
P4	16,84	A-5	ML
P5	18,59	A-7-5	MH
P6	19,10	A-7-5	MH
P7	18,23	A-7-5	MH
P8	17,68	A-5	ML
P9	0,00	A-7-5	ML

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Tabela 21 – Valores de índice de grupo do solo ensaiado sem o uso de defloculante e classificações TRB e SUCS

Ponto	Índice de Grupo IG	Classificação	
	SEM Defl.	TRB	SUCS
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.

Como se trata de classificação do solo, neste ponto da pesquisa, os dados não foram selecionados por meio de estatística e nem as médias foram calculadas. A classificação final do solo será definida de acordo com o resultado que mais se repete. Por se tratar de um estudo para o solo natural do subleito que não será compactado, ou seja, será utilizado em suas condições naturais de campo, optou-se por levar em consideração, na classificação final, apenas os resultados dos ensaios realizados sem defloculante.

Desta forma, 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.

4.3 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 (ρ) e peso específico (γ) estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de Frasco de Areia

Ponto	Frasco de Areia		
	ρ Seco (g/cm ³)	ρ Úmi. (g/cm ³)	γ Seco kN/m ³
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
Média	1,36	1,69	13,38

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

A partir das médias é possível afirmar que a massa específica aparente seca do solo é de 1,36 g/cm³, a massa específica aparente úmida é de 1,69 g/cm³ e o peso específico é de 13,38 kN/m³.

4.4 Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade (k) do subleito foi obtido por meio do ensaio de permeabilidade de Porchet, os resultados obtidos por meio deste ensaio estão apresentados na Tabela 23. No Apêndice J estão apresentados todos os dados obtidos por meio do ensaio de permeabilidade de Porchet.

Tabela 23 – 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
Média	5,47E-05
Desv. Pad.	2,02E-05

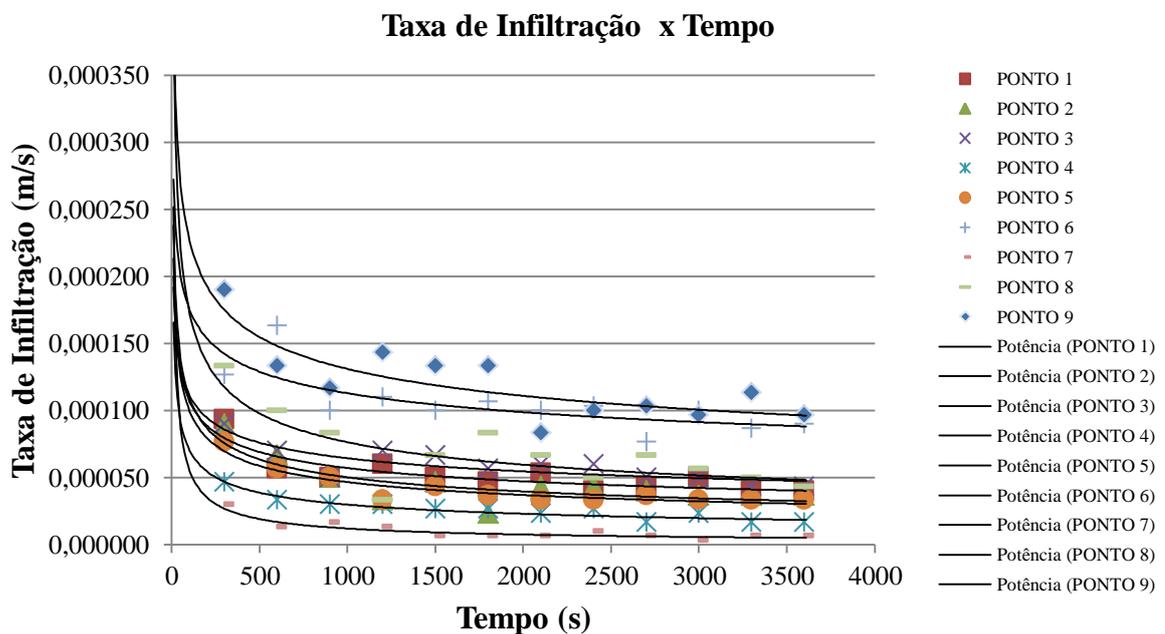
Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Ao analisar os resultados nota-se que o coeficiente de permeabilidade é na grandeza de 10^{-5} , sendo assim, em conformidade com a Tabela 5, o tipo de infiltração do pavimento é classificada como infiltração parcial e, de acordo com as informações da Tabela 6, se comporta como areia, apresentando boa capacidade drenante.

4.5 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 5. No Apêndice K os gráficos de cada ponto de sondagem estão apresentados separadamente, juntamente com os dados obtidos em campo para o desenvolvimento dos cálculos. Os resultados obtidos com o ensaio de infiltração duplo anel estão apresentados na Tabela 24.

Gráfico 5 – Taxa de infiltração x tempo de todos os pontos estudados



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Tabela 24 – 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
Média	3,14E-05
Des. Pad.	1,30E-05

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

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.

4.6 Módulo de Resiliência

Os valores médios de Módulo de Resiliência estão apresentados na Tabela 25. 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. Os dados gerais do módulo de resiliência, de acordo com a tensão confinante e tensão máxima, estão apresentados no Apêndice L.

Tabela 25 – 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
Média			37,38
Desv. Pad.			11,13
C.V.			30%

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

De acordo com as Instruções de Projeto de análises mecânicas quanto a 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 26 a seguir, estão apresentados os valores das constantes de regressão de cada ensaio de módulo de resiliência, de acordo com os modelos apresentados anteriormente na Tabela 11, juntamente com o coeficiente de determinação (R^2) para cada modelo.

Tabela 26 – Valores das constantes de regressão para os modelos apresentados

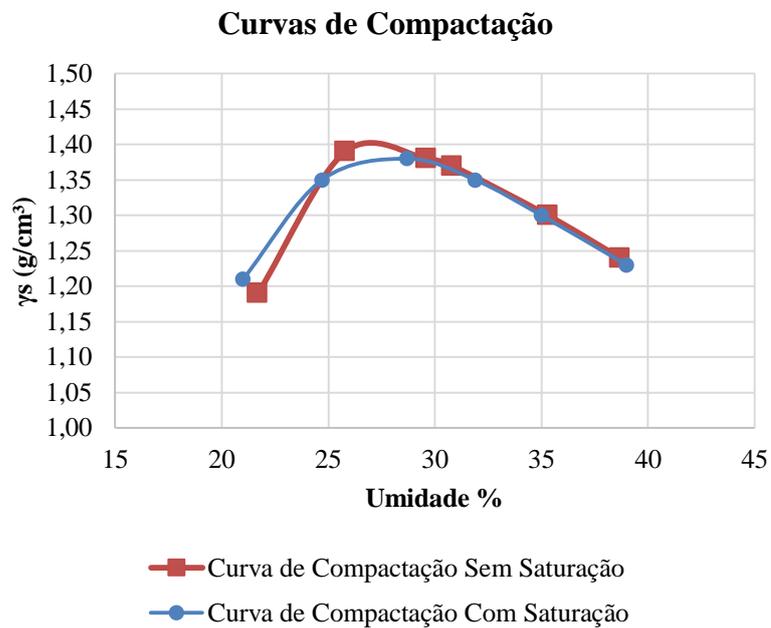
Amostra	Modelos													
	A			B			C				D			
	<i>k1</i>	<i>k2</i>	R^2	<i>k1</i>	<i>k2</i>	R^2	<i>k1</i>	<i>k2</i>	<i>k3</i>	R^2	<i>k1</i>	<i>k2</i>	<i>k3</i>	R^2
CP1	23,433	-0,157	0,43	40,675	-0,007	0	20,478	0,165	-0,033	0,45	0,066	-0,257	455,79	0,44
CP2	6,66	-0,458	0,74	55,083	0,148	0,09	6,568	-0,459	-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.

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 à uma determinada tensão.

4.7 Correlação entre CBR e DCP

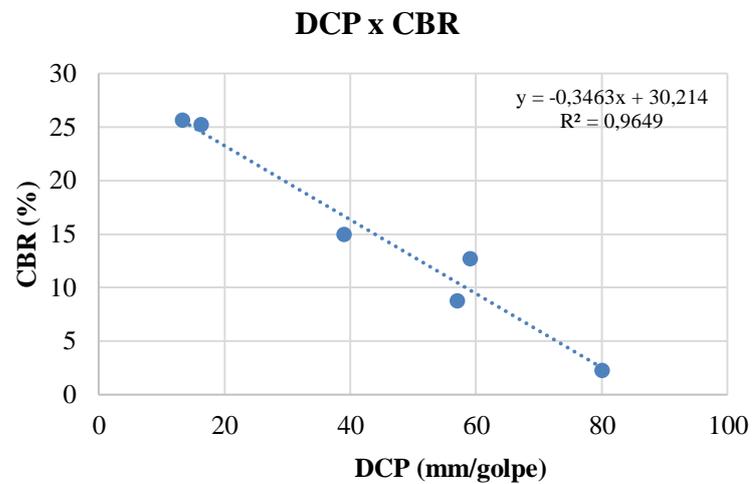
Para estabelecer as correlações entre CBR e DCP foram compactados no total 12 corpos de prova (CPs), onde 6 não foram submersos na água e os outros 6 foram realizados de acordo com os procedimentos padrão. As duas curvas de compactação estão representadas no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Curvas de compactação

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

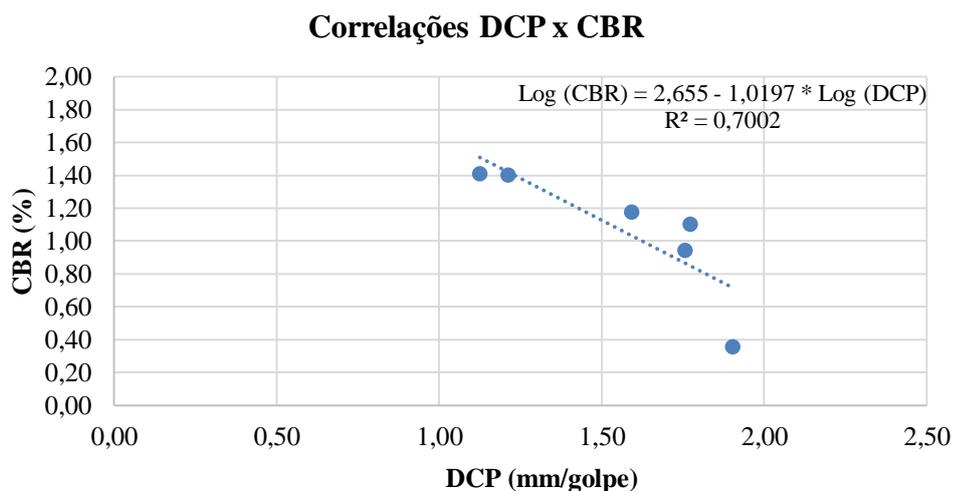
Analisando o Gráfico 6 acima, pode-se notar que alguns CPs foram compactados muito próximos ao limite de liquidez do solo, ficando muito moles. Devido à consistência e pelo corpo de prova possuir em média apenas 12 cm de altura optou-se por não realizar o ensaio de DCP nestes CPs, pois o DCP iria facilmente 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 7 apresenta as correlações lineares obtidas por meio dos ensaios de CBR e DCP. Todos os resultados e dados obtidos para a determinação das relações estão apresentados no Apêndice M.

Gráfico 7 – Valores de DCP e CBR correlacionados

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

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 8 apresenta a correlação que representa os ensaios de DCP e CBR do solo estudado, por meio dele é possível obter a Equação 22, que correlaciona os parâmetros de DCP e CBR.

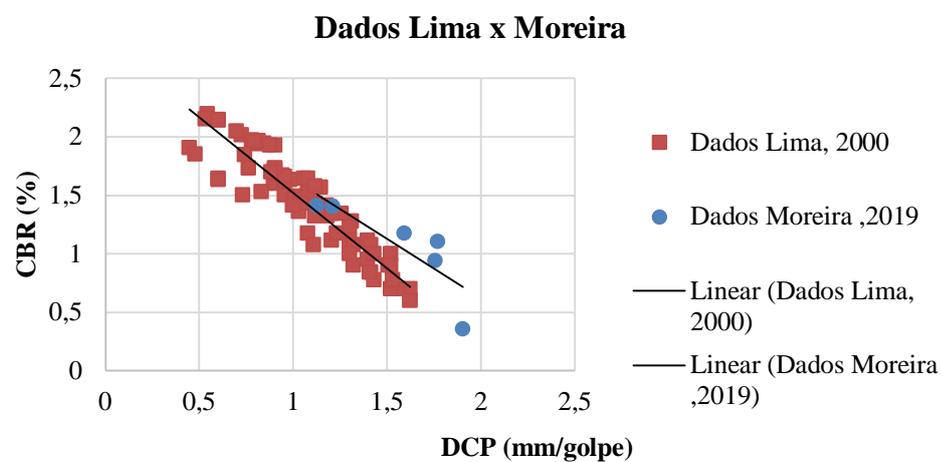
Gráfico 8 – Valores de DCP e CBR correlacionados em base logarítmica

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

$$\text{Log (CBR)} = 2,655 - 1,0197 * \text{Log (DCP)} \quad (\text{eq. 22})$$

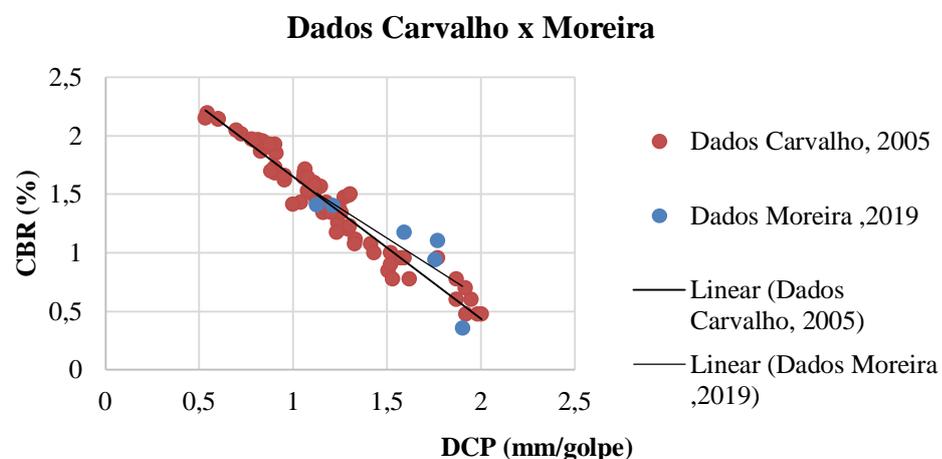
Os valores obtidos por meio das correlações foram comparados com os valores obtidos por Lima (2000) e Carvalho (2005) em suas pesquisas, representados nos Gráficos 9 e 10. Ao analisar comparações observa-se que os dados obtidos nesta pesquisa são mais próximos dos resultados de Lima (2000). Entretanto, a correlação linear obtida nesta pesquisa e mostrada no Gráfico 7 possui um melhor coeficiente de correlação e pode ser usada diretamente para fins de projeto com o solo local.

Gráfico 9 – Comparação entre dados das correlações CBR x DCP de Lima (2000) e Moreira (2019)



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Gráfico 10 – Comparação entre dados das correlações CBR x DCP de Carvalho (2005) e Moreira (2019)



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

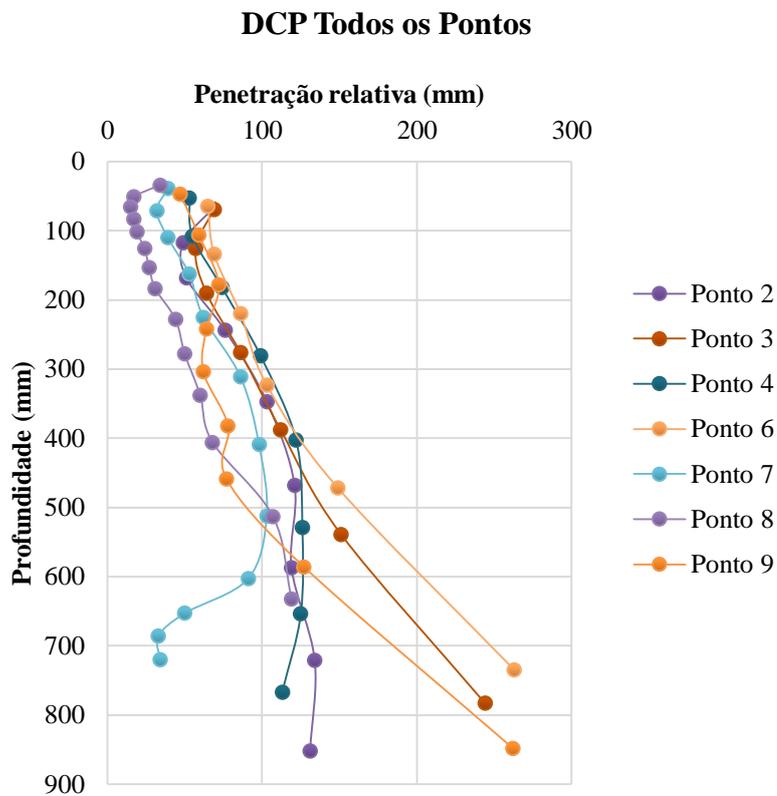
4.8 Ensaio de DCP em Campo

Os resultados obtidos por meio do ensaio de DCP realizados em campo estão apresentados na Tabela 27 e representados no Gráfico 11. Os pontos 1 e 5 foram removidos por não representarem bem a amostra de dados. Todos os dados obtidos por meio do ensaio de DCP em campo estão apresentados no Apêndice N.

Tabela 27 – 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
Média	76,20	35,14
Desv. Pad.	13,62	1,96
C.V	17,9%	5,6%

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Gráfico 11 – 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 23 que correlaciona o CBR com o DCP para o solo em estudo. A Tabela 28 apresenta os valores de CBR obtidos por meio da Equação 23.

Tabela 28 – 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
CBR Médio (%)	5,67						
Desv. Pad.	1,27						

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

A partir dos valores de CBR determinados por meio da Equação 23, é possível afirmar que o valor de CBR do solo do subleito é em torno de 5%.

O método de projeto de pavimentos flexíveis do DNER (1981) sugere que o valor do CBR seja corrigido em função do Índice de Grupo nos casos em que o valor do CBR seja maior que o prescrito na Tabela 29, considerando o índice de grupo médio do solo em estudo como 1, o CBR_{IG} seria de 18, não se fazendo necessário a correção. Vale lembrar que os ensaios de DCP realizados em campo foram realizados após os ensaios de infiltração, ou seja, estando o solo com alto teor de umidade, com sua resistência avaliada numa condição desfavorável, minorando o seu valor.

Tabela 29 – Valores de CBR de acordo com o Índice de grupo

Índice de Grupo (I.G.)	CBR I.G.
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Fonte: DNER, 1981.

5 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

5.1 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.

De acordo com a NBR 16.146 (ABNT, 2015), o dimensionamento hidráulico é realizado a partir da seguinte Equação 23. Na Figura 61 está representado os parâmetros de projeto para o dimensionamento.

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{\Delta Q_c * R + P - f * T_e}{V_r} \quad (\text{eq.23})$$

Onde:

$H_{m\acute{a}x}$ = espessura total da camada reservatório (m)

ΔQ_c = precipitação excedente da área de contribuição para dada chuva de projeto (m)

R = relação entre a área de contribuição e a área de pavimento permeável (A_c/A_p)

A_c = área de contribuição (m²)

A_p = área de pavimento permeável (m²)

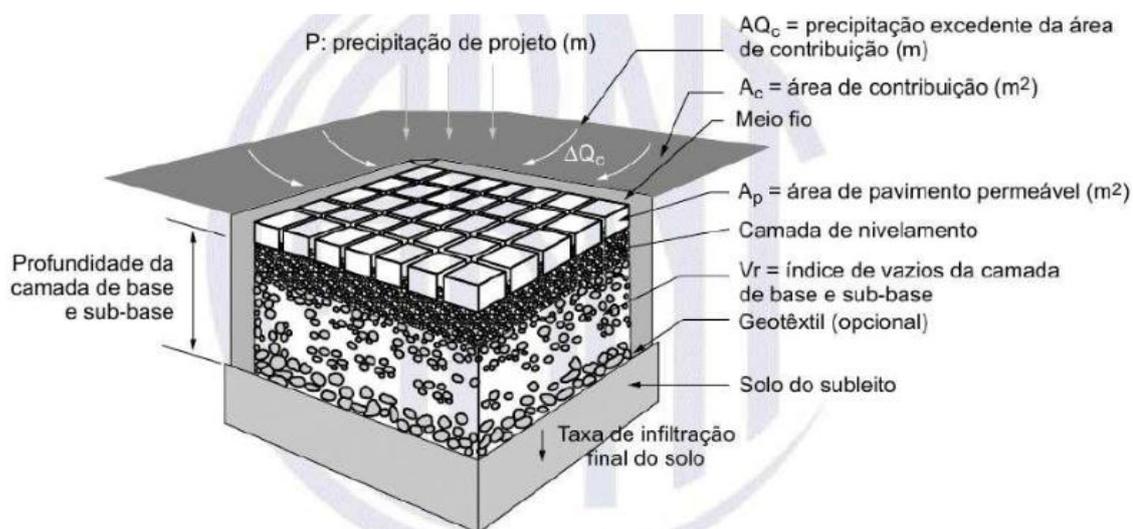
P = precipitação de projeto (m)

f = taxa de infiltração no solo (m/h)

T_e = tempo efetivo de enchimento da camada reservatório, geralmente igual a 2 h

V_r = índice de vazios da camada

Figura 61 – Parâmetros de projeto para o dimensionamento da camada de base



Fonte: NBR 16.416, ABNT 2015.

Devido às condições topográficas o local em estudo encontra-se em local elevado, não havendo área de contribuição. Por este motivo, o valor da precipitação excedente será considerado nulo e a relação entre a área de contribuição e a área do pavimento permeável será unitária.

A partir dos ensaios de infiltração no subleito foi determinada a taxa de infiltração do solo como sendo de $5,98 \times 10^{-6}$ m/s, equivalente à 0,0215 m/h. Para a determinação do índice de vazios do material que irá compor a camada de base, foi utilizado o valor mínimo exigido por norma de 32%, referenciado anteriormente na Tabela 3.

A determinação da precipitação de projeto foi realizada com base no Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem do DNIT (2005) como sendo de 0,067 metros.

Substituindo todos os valores na Equação 24, tem-se que a espessura da camada de base deve ser de 7 centímetros para que atenda as solicitações hidráulicas do pavimento. Entretanto, de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a espessura mínima exigida para camadas granulares é de 10 cm, sendo esta adotada como espessura da camada de base do dimensionamento hidráulico do pavimento permeável.

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.

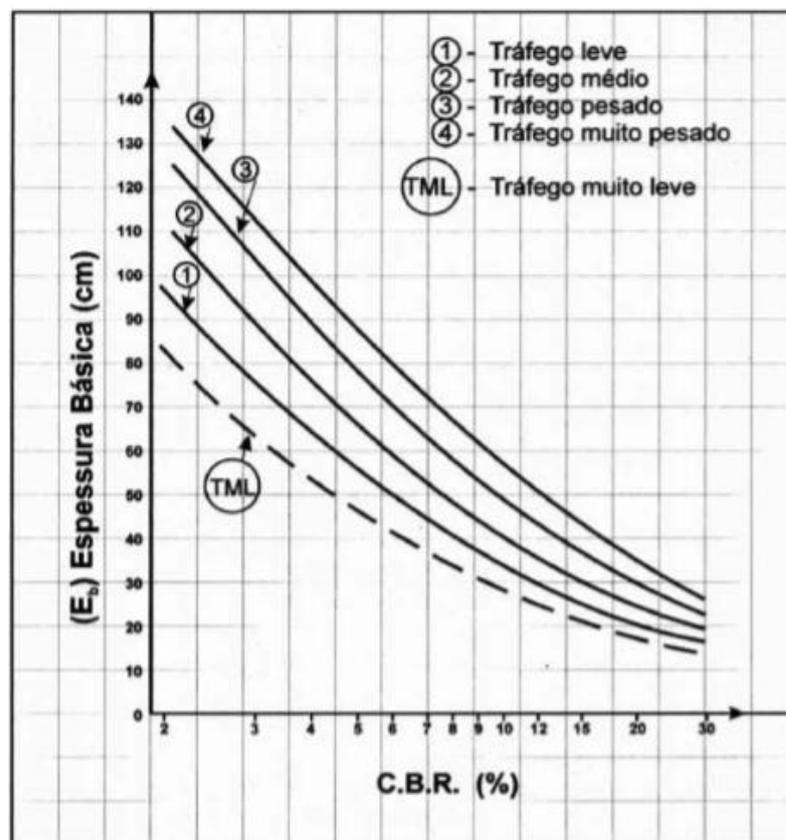
A partir das características de permeabilidade do subleito de acordo com a NBR 16.416 (ABNT, 2015) o tipo de infiltração do pavimento é dado como infiltração parcial, havendo necessidade de utilização de drenos no pavimento para auxiliar no escoamento da água. Porém, com base no dimensionamento hidráulico, 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 (2006).

5.2 Dimensionamento Mecânico

O dimensionamento mecânico será 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%, conforme apresentado na Tabela 28. O dimensionamento então é obtido por meio do Ábaco de Dimensionamento – PMSP, apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Ábaco para dimensionamento de pavimento



Fonte: Senço, 2007.

Com base no Ábaco de Dimensionamento tem-se que a espessura básica do pavimento é de 48 centímetros, entrando-se com CBR = 5%.

Para definir a espessura das camadas que irão compor o pavimento é necessário realizar uma equivalência estrutural, considerando um coeficiente de equivalência com base no tipo de material, previstos também no método de dimensionamento do DNER. Os coeficientes de equivalência para materiais utilizados em pavimentos estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Valores dos coeficientes de equivalência estrutural - K

Tipo de material	Símbolo	K
Revestimento de concreto asfáltico	CA	2,0
Base de concreto magro	CM	2,0
"Bínder"	BI	1,7
Base de solo-cimento	SC	1,4
Revestimento asfáltico de penetração	PI	1,2
Pavimento articulado de concreto	PA	1,2
Base de macadame betuminoso	MB	1,2
Base de macadame hidráulico	MH	1,0
Paralelepípedos	PMQ	1,0
Areia	A	1,0

Observação: Pavimentos antigos de paralelepípedos. Quando recapados com misturas betuminosas, o valor de K poderá variar de 1,2 a 1,8, em função do comportamento, abaulamento e rejuntamento dos paralelepípedos

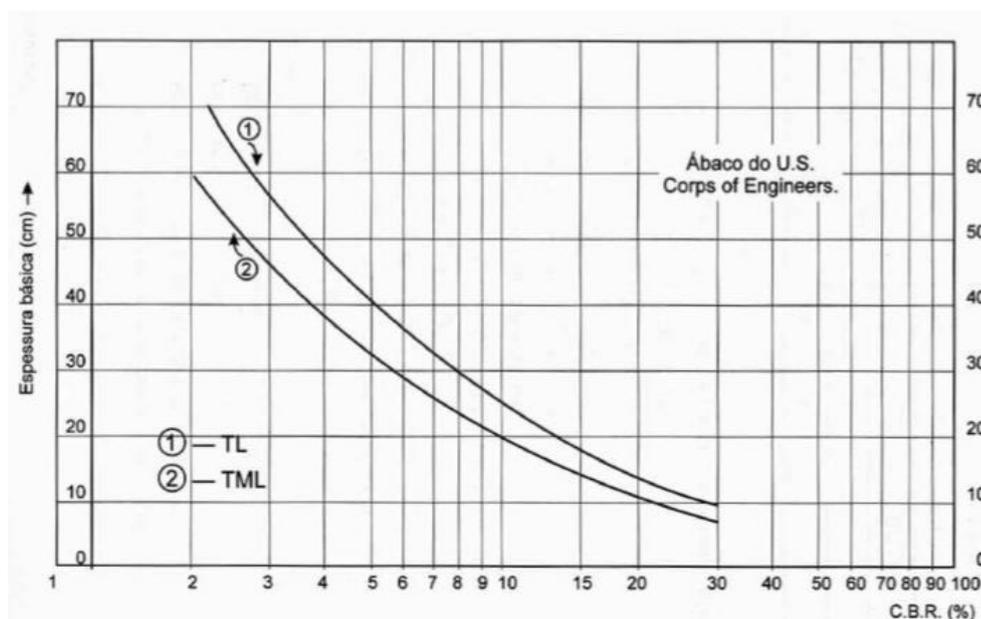
Extensão para pavimentos tipo E		
Pré- misturado a quente	PMQ	1,8
Bica corrida selecionada	BCS	0,9

Fonte: Senço, 2007.

Considerando a placa de concreto permeável como pavimento articulado de concreto (PA) tem-se o coeficiente de 1,2 (Tabela 30). Como a placa possui uma espessura de 8 cm, este valor é multiplicado pelo coeficiente de equivalência estrutural resultando em 9,6 cm. Sendo assim, ao considerar o coeficiente da camada de base como sendo 1, tem-se que a placa de concreto permeável equivale a 9,6 cm de base granular.

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 apresentado na Figura 63. As outras etapas do dimensionamento são as mesmas do método citado anteriormente.

Figura 63 – Ábaco para dimensionamento (econômico)

Fonte: Senço, 2007.

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).

Ao final de ambos os dimensionamentos, hidráulico e mecânico, tem-se os valores das espessuras das camadas que o pavimento deve possuir para garantir a resistência necessária para suportar os esforços mecânicos e as solicitações hidráulicas, estes valores estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Resultados dos dimensionamentos Hidráulico e Mecânico

Espessura (cm)		
Camada	Dim. Hidráulico	Dim. Mecânico
Revestimento	8 cm	8 cm
Assentamento	2 cm	2 cm
Base	10 cm	22 cm
Espessura total do pavimento	20 cm	32 cm

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

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 os requisitos solicitados pelo dimensionamento hidráulico quanto aos requisitos do dimensionamento mecânico.

6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento urbano das cidades está fazendo com que o solo fique cada vez mais impermeável, provocando o escoamento superficial de águas pluviais e promovendo alguns possíveis desastres, decorrentes de enchentes. Entende-se que esta situação pode ser amenizada ou até mesmo evitada com a instalação de pavimentos permeáveis, e neste contexto, a implementação de estacionamentos compostos por pavimento permeável é uma possível solução para evitar escoamentos superficiais e enchentes em grandes centros urbanos.

Neste contexto, 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 a distribuição granulométrica, limites de consistência do solo e outras propriedades que podem ser relacionadas com a capacidade de suporte do solo.

Apesar de à rigor o solo ser classificado como argiloso, com base nos ensaios de caracterização sem o uso de defloculante, ele possui comportamento de areia fina. Em diversas pesquisas relacionadas ao solo de Brasília é possível notar que o solo local tende a desagregar com o uso de defloculante, alterando assim sua característica granulométrica. Assim sendo, 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. Devido às dificuldades encontradas, em campo, durante a extração do corpo de prova do molde, os resultados de massa específica podem ter sofrido alguma alteração, não representando totalmente as condições de campo. Recomenda-se para pesquisas futuras, a coleta de amostra com moldes bipartidos para não forçar a saída da amostra do molde, de modo a manter suas características naturais de campo.

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. Para realizar um dimensionamento com base nas propriedades mecânicas do pavimento seria necessário a utilização um método mecanístico, sendo assim seriam necessários mais parâmetros de projeto, como por exemplo, o módulo da brita. Devido ao baixo volume de tráfego considerado nos cálculos do dimensionamento mecânico no pavimento permeável, optou-se por não realizar tais ensaios de módulo por não serem essenciais no momento.

Por estar localizado dentro de uma instituição de ensino e ser um local utilizado apenas por professores, não existe a possibilidade de contaminação do lençol freático por meio da água que irá infiltrar no pavimento. O estacionamento do Bloco 8 do Centro Universitário de Brasília UniCEUB está localizado em uma área que não recebe água de áreas de contribuição adjacentes, sendo assim, devido ao fato de o estacionamento não possuir área de contribuição, levará mais tempo para a colmatação dos poros do pavimento permeável, melhorando a eficiência do pavimento.

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.

6.1 Sugestões Para Novas Pesquisas

De acordo com os entendimentos adquiridos no estudo, sugere-se para novas pesquisas:

- Realizar correlações entre CBR e DCP, em corpos de prova mais altos que permita a aplicação de mais golpes do DCP. E também para a compactação, utilizar energias intermediária e modificada para obter mais dados à serem correlacionados;
- Simular a compactação e umidade natural de campo em laboratório nos corpos de prova a serem utilizados no ensaio de módulo de resiliência;
- Dimensionar outros tipos de pavimentos permeáveis com materiais alternativos em todas as suas camadas;
- Realizar o dimensionamento mecânico com base em análises computacionais por métodos mecanísticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T307-99: *Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*. Washington, DC, 1999.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

_____NBR 7.181: *Análise granulométrica de solos*. Rio de Janeiro, 1984.

_____NBR 6.502: *Rochas e solos*. Rio de Janeiro, 1995.

_____NBR 13.292: *Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*. Rio de Janeiro, 1995.

_____NBR 14.545: *Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável* Rio de Janeiro, 2000.

_____NBR NM 51: *Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”*. Rio de Janeiro, 2001.

_____NBR NM 46: *Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 mm, por lavagem*. Rio de Janeiro, 2003.

_____NBR NM 45: *Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.

_____NBR 12.142: *Concreto – Determinação de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. Rio de Janeiro, 2010.

_____NBR 7.212: *Execução de concreto dosado em central – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2012.

_____NBR 6.484: *Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2015.

_____NBR 16.416: *Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro, 2015.

_____NBR 6.457: *Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização*. Rio de Janeiro, 2016.

_____NBR 6.459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2016.

_____NBR 7.180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.

_____NBR 7.182: *Solo* – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____NBR 7.185 *Solo* – Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016.

_____NBR 9.895: *Solo* – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____NBR 6.458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm* – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

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.

ALESSI, Fernando; KOKOT, Pedro Júnior; GOMES, Júlio. *Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso*. *Revista da Vinci*, Curitiba, v.3, n.1, p. 139-156, 2006.

ASTM – American Society for Testing Materials. ASTM D6951: *Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications*. West Conshohocken, PA, 2018.

BATEZINI, Rafael. *Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves*. 2013. 133f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BARROS, Marcelo de B.; RUFINO Iana A. A.; MIRANDA Livia I. B. de. *Mecanismos poupadores de água como suporte ao planejamento urbano*. B1. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 251-262, jan./mar. 2016.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Petrobras Asfaltos. Rio de Janeiro: Abeda, 2006.

BRASIL. *Lei Complementar nº 809, de 25 de abril de 2009*. Disponível em: <<http://www.segeth.df.gov.br/plano-diretor-de-ordenamento-territorial/>> Acesso em: 03 set. 2018.

BRASIL ESCOLA. *Problemas ambientais urbanos*. Disponível em: <<https://bit.ly/2NxEHn8>> Acesso em 30 ago. 2018.

BUTTLER, David; DAVIES, John W. *Urban Drainage*. 3. ed. New York: Taylor e Francis Group, 2011.

CANHOLI, Aluísio Pardo. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CAPUTO, Homero Pinto. *Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos*. 6. ed. Rio de Janeiro: LCT, 1988.

CARVALHO, José Camapum de; FARIAS, Márcio Muniz de; REZENDE, Lilian Ribeiro de. Infiltração em pavimento: problemas e soluções. In: CARVALHO, GITIRANA JUNIOR e CARVALHO (Org.). *Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas*. Brasília: UnB, 2012. p. 607-620.

CARVALHO, Ronaldo Gonçalves de. *Correlações entre os ensaios DCP e CBR para solos saprolíticos de textura fina*. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeroportuária, Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA, São Paulo, São José dos Campos, 2005.

DAS, Braja M. *Fundamentos da engenharia geotécnica*. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DIERKES, Carsten *et al.* *Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements*. In: International Conference on Urban Drainage. Portland, Oregon: American Society of Civil Engineers, 2004. p.01-13.

DELATTE Norb P. E. *Developing a structural design method for pervious concrete pavement*. Cleveland State University, 2005. Disponível em: <<https://bit.ly/2z3rBIU>> Acesso em: 09 nov. 2018.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE ROGAGEM.

_____ DNER – *Método de projeto de pavimentos permeáveis*, Rio de Janeiro, 1981.

_____ DNER-ME 051: *Solos – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1994.

_____ DNER-ME 082: *Solos – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 1994.

_____ DNER-ME 092: *Solos – Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia*. Rio de Janeiro, 1994.

_____ DNER-ME 093: *Solos – Determinação da densidade real*. Rio de Janeiro, 1994.

_____ DNER-ME 122: *Solos – Determinação do limite de liquidez – método referência e método expedito*. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

_____. DNIT – *Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. DNIT – *Manual de pavimentação*, 2006.

_____. DNIT – *Manual de implantação básica de rodovia*. 3.ed., 2010a.

_____. DNIT 134/2010 – ME: Pavimentação – Solos – *Determinação do módulo de resiliência* – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b.

_____. DNIT – *Guia de análise de projetos rodoviários*, 2018.

DOCAMPO, Manuel García. Tendências recentes das dinâmicas urbanas e residenciais. In: ARAUJO, Eliete de Pinho *et al.* *Cidade e habitação: Tendências urbanas contemporâneas*. Brasília: UniCEUB, ICPD, 2018.

EISENBERG, B.; LINDOW, K. C.; SMITH, D. R. *Permeable Pavements*. Reston, EUA: American Society of Civil Engineers, 2015.

FERNANDES, Ramon. *Desenvolvimento de correlação entre os ensaio DCP e CBR estudo de caso: pista de testes*, UFSC-Joinville. 2015. 81f. Monografia de Projeto Final, Centro de Engenharias da Mobilidade – CEM, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Joinville, 2015.

FIELD, Richard; MASTERS, Hugh; SINGER, Melvin. *Status of porous pavement research*. Elsevier, v. 16, n. 6, p. 849-858, 1982.

FORTES, Rita Moura; MERIGHI, João Virgílio; ZUPPOLLINI, Alexandre Neto. *Método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais*. 2º Congresso Rodoviário Português. Lisboa, Portugal, 2002.

GUEDES, Cláudia de Sousa. *Avaliação do desempenho hidrológico de pavimentos permeáveis*. 2015. 95 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

GUIMARÃES, Renato Cabral. *Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas*. 2002. 207 f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasília, 2002.

HANSEN, K. *Porous asphalt pavements for stormwater management: design, construction and maintenance guide*. National Asphalt Pavement Association (NAPA). Information Series 131, Lanham, 2008.

HOLTZ, Fabiano da Costa. *Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental*. 2011. 138f. Dissertação de Mestrado – Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2019. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/> >. Acesso em: 04 jan. 2019.

INSTRUÇÃO DE PROJETOS – IP – 08/2004. *Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento*. Prefeitura de São Paulo, Infraestrutura urbana e obras. São Paulo, 2004.

INTERPAVE. *Permeable pavements: Guide to design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements*. Publicação L534:L217, Ed. 6. Leicester, 2010.

JABUR, Andrea Sartori *et al.* *Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis*. B1. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*, Porto Alegre, v. 20, n.4, p. 937-945, out. / dez. 2015.

KAYHANIAN, Masoud *et al.* *The application of permeable pavement with emphasis on water quality benefits, and identification of knowledge and data gaps*. California: NCST, 2015.

KIA, Alalea; WONG Hong S.; CHEESEMAN Christopher R. Clogging Permeable concrete: a review. *Journal of Environmental Management*, Londres, v. 193, p. 221-233, 2017.

LEOPOLD, Luna B. *Hydrology for Urban Land Planning – A guidebook on the hydrologic Effects of Urban Land Use*. Washington: United States Department of the Interior, 1968. Disponível em: < <https://pubs.usgs.gov/circ/1968/0554/report.pdf> > Acesso em: 03 set. 2018.

LIMA, Luiz Carlos. *O ensaio DCP aplicado no controle de qualidade de compactação de obras viárias executadas com solos lateríticos de textura fina*. Tese de Doutorado – Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeroportuária, Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA, São Paulo, São José dos Campos, 2000.

MANUAL TÉCNICO DE DRENAGEM URBANA (MTDU-DF). *Plano diretor de drenagem urbana do Distrito Federal*. Concremat Engenharia; Secretaria de Estado de Obras; NOVACAP.v. 2. Brasília, 2009.

MAPS – IOS, Região de Brasília, 2018.

MARCHIONI, Mariana; SILVA, Cláudio O. *Pavimento intertravado permeável – Melhores práticas*. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. São Paulo, 2011a.

MARCHIONI, Mariana; SILVA, Cláudio O. *Sistemas construtivos: pavimentos permeáveis – Manutenção para Pavimentos Intertravados Permeável – Prática Recomendada PR-1*. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. São Paulo, 2011b.

MARCHIONI, Mariana; SILVA, Cláudio O. *Sistemas construtivos: pavimentos permeáveis – Conceitos e Requisitos para Pavimentos Intertravados Permeável – Prática Recomendada PR-2*. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. São Paulo, 2011c.

MILLER, A. Richard. *Porous pavement: pavement that leaks*, 1989. Disponível em: <<http://millermicro.com/porpave.html>> Acesso em: 10 out. 2018.

MINVU – MINISTERIOS DE VIVIENDA Y URBANISMO. *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias em sectores urbanos*. Guía de Diseño. Santiago, Chile, 1996.

MOTA, Neusa Maria Bezerra. *Ensaio avançados de campo na argila porosa não saturada de Brasília: interpretação e aplicação em projeto de fundação*. 2003. 364 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

OLIVEIRA, Lilian Corpas Bucene. *Análise da permeabilidade e da colmatção em concretos permeáveis produzidos com agregado reciclado de concreto*. 2017. 106f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Campinas – PUC-Campinas, Campinas, 2017.

PAIGE-GREEN, P; PLESSIS, L Du. *The use and interpretation of the dynamic cone penetrometer (DCP) test*. CSIR Built Environment, Pretoria, 2009.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. *O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano*. 2011. 283 f. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PRATT, C. J.; MANTLE J. D. G.; SCHOFIELD P. A. *UK Research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality*. Water Science and Technology. v. 32. n. 1. p. 63-69.1995.

SANTOS, Cristiano de Assumpção. *Impacto da utilização de pavimentação permeável em áreas urbanas na recuperação de bacias hidrográficas*. 2016. 64f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2016.

SCARATI, José Rodolfo. *Gestão da drenagem urbana: só tecnologia será suficiente?* Artigo científico, v.1, p.11. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2012.

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

SILVA, Sidnei Pereira da. *Ferramenta de apoio ao manejo de águas pluviais urbanas com base em indicadores de sustentabilidade – SAMSAP*. 2016. 263f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 2016.

SILVEIRA, André L. da; LOUZADA, José A.; BELTRAME, Lawson F. *Infiltração e armazenamento no solo*. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Organizador. *Hidrologia:*

ciência e aplicação. 2. ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, ABRH, 2001. p. 335- 372.

SILVEIRA, Rafaela Nazareth Pinheiro de Oliveira. *Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedreira para utilização em pavimentos rodoviários*. 2010. 185 f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasília, 2010.

SUDERHSA: Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. *Manual de drenagem urbana*. Versão 1.0. Região Metropolitana de Curitiba, Paraná, 2002.

TERSAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. *Soil mechanics in engineering practice*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Água no meio urbano. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Organizador. *Água Doce*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 1997. p. 1- 40.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Drenagem urbana. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Organizador. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, ABRH, 2001. p. 805 - 847.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gerenciamento da Drenagem Urbana. B1. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*, Porto Alegre, v. 7, n.1, p. 5-27, jan./ mar. 2002.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Inundações e Drenagem Urbana. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli e Juan Carlos Bertoni. Organizadores. *Inundações Urbanas na América do Sul*. 1. ed. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, 2003. p. 45- 129.

VAZ, Valéria Borges. *Drenagem urbana*. Boletim Informativo nº5, ano VI. Rio Grande do Sul, 2004.

VIANA, H. M. F. *Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo*. 2007. 321f. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Carlos, 2007.

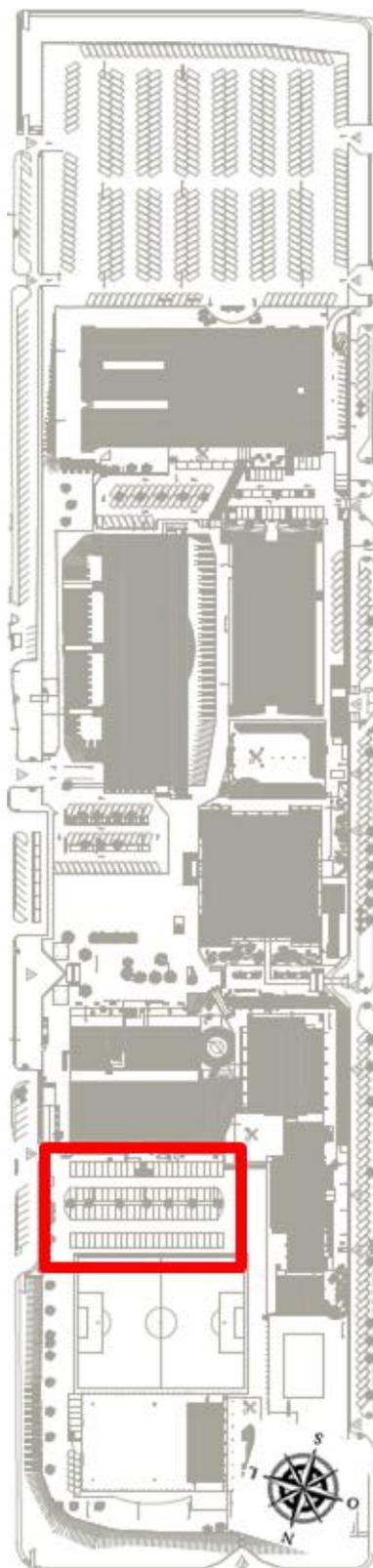
VIGILIIS, Afonso Luís Corrêa de. *Procedimento de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VILLELLA Swami M.; MATTOS Arthur. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill, 1974.

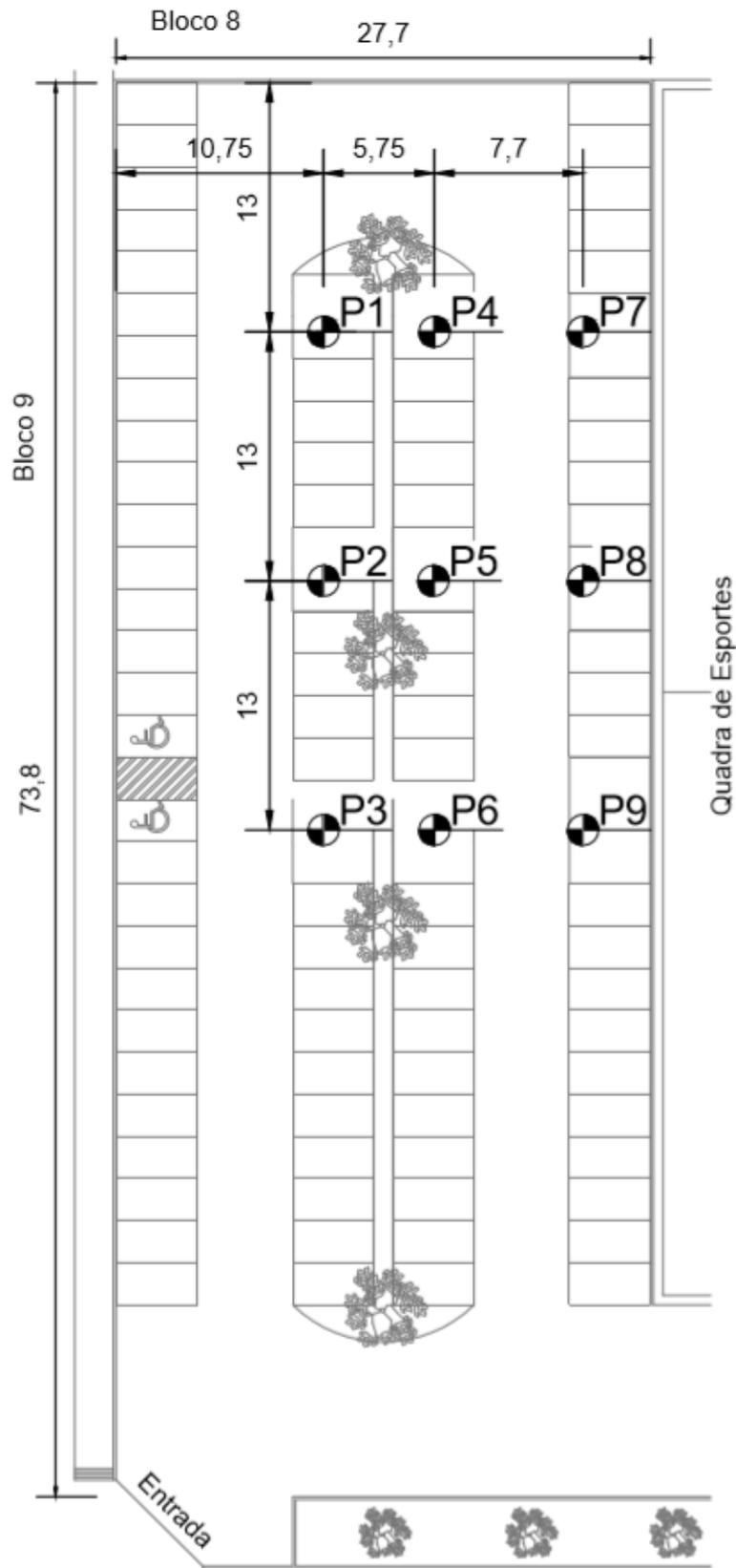
WAPA – Wisconsin Asphalt Pavement Association. Technical Bulletin: *Porous asphalt pavements*. Wisconsin, EUA, 2015.

WOODS-BALLARD B. *et al.* *The SuDS manual*. Londres: Ciria, 2007.

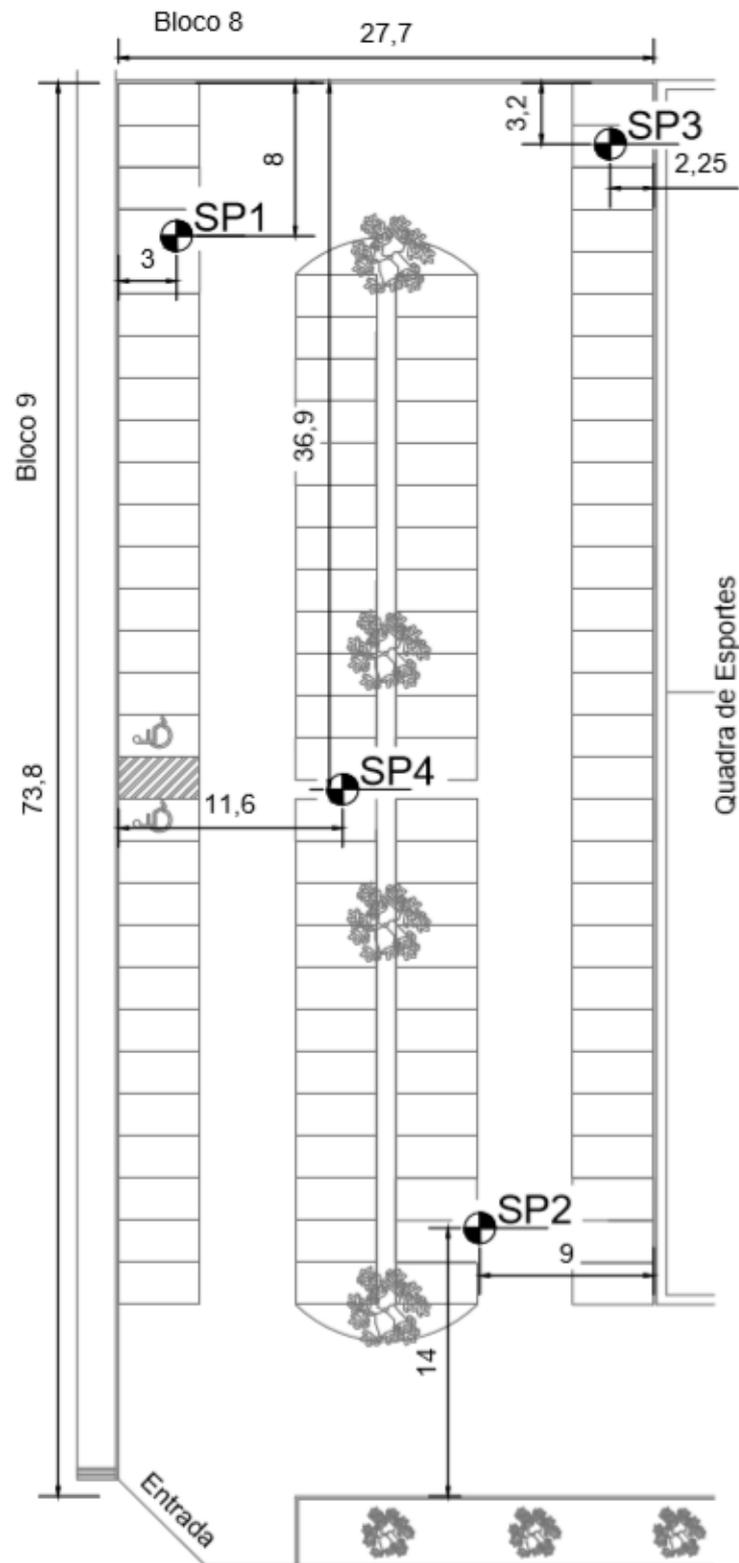
APÊNDICE A – Planta Baixa do UniCEUB – Asa Norte com destaque da área do estacionamento em estudo



APÊNDICE B – Locação dos Pontos de Sondagem no Estacionamento

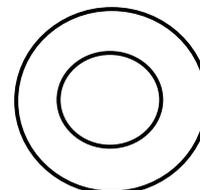


APÊNDICE C – Locação dos Pontos de Sondagem SPT no Estacionamento



APÊNDICE D – Tabela para Coleta de Dados do Ensaio de Duplo Anel

Ensaio de Infiltração Duplo Anel



Crava-se os cilindros; Adiciona-se água; Coloca-se o medidor; Anotam-se medidas até a leitura se repetir por 3x consecutivas

Local: _____ **Data:** ____/____/____ **Cota do furo:** _____

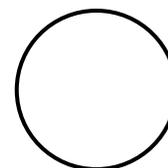
Hora de Início: _____

✓ Após este ensaio, executar o ensaio de DCP

Tempo (min)	Tempo (s)	Medida (cm)
0	0	
5	300	
10	600	
15	900	
20	1200	
25	1500	
30	1800	
35	2100	
40	2400	
45	2700	
50	3000	
55	3300	
60	3600	
65	3900	
70	4200	

APÊNDICE E – Tabela para Coleta de Dados do Ensaio de Permeabilidade - Porchet

Ensaio de Permeabilidade – PORCHET



Poço de 30x70cm escavado; enche de água; coleta medidas conforme a água infiltra

Local: _____ **Data:** ___/___/___ **Hora de Início:** _____

Cota do furo: _____ **Profundidade:** _____ **Diâmetro:** _____

Tempo (min)	Tempo (s)	Medida (cm)
0	0	
5	300	
10	600	
15	900	
20	1200	
25	1500	
30	1800	

APÊNDICE F – Tabela para Coleta de Dados do Ensaio de DCP

Ensaio de DCP



Posiciona-se o equipamento no centro do furo de infiltração. Mede-se altura inicial do para calibrar; Anota-se quanto penetrou após cada golpe. Penetrar de 50-70cm medindo cada golpe.

Local: _____ **Data:** ____/____/____ **Hora de Início:** _____

- ✓ após ensaio coletar um pouco de amostra do solo úmido onde o DCP foi executado (Zipper bag)
- ✓ após ensaio, escavar buraco para ensaio de Permeabilidade de Porchet (coletar +/- 50KG de solo)

Nº de Golpes	Medida (cm)
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	

APÊNDICE G – Checklist de Equipamentos e Materiais – Utilizados na execução de procedimentos e ensaios *in situ*

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Areia p/ frasco de areia | <input type="checkbox"/> Infiltrômetros |
| <input type="checkbox"/> Balança | <input type="checkbox"/> Lona |
| <input type="checkbox"/> Baldes | <input type="checkbox"/> Luvas |
| <input type="checkbox"/> Banco | <input type="checkbox"/> Nível cantoneira |
| <input type="checkbox"/> Bico de torneira | <input type="checkbox"/> Mangueira |
| <input type="checkbox"/> Boias com suporte graduado | <input type="checkbox"/> Marreta |
| <input type="checkbox"/> Brita | <input type="checkbox"/> Óculos de proteção |
| <input type="checkbox"/> Cavadeira | <input type="checkbox"/> Pá |
| <input type="checkbox"/> Chave allen (p/ DCP) | <input type="checkbox"/> Papel filme |
| <input type="checkbox"/> Chave de boca (p/ DCP) | <input type="checkbox"/> Picareta |
| <input type="checkbox"/> Chibanca | <input type="checkbox"/> Pincel |
| <input type="checkbox"/> Cilíndros p/ molde | <input type="checkbox"/> Pincel atômico |
| <input type="checkbox"/> Cronômetros | <input type="checkbox"/> Saco plástico 5 Kg |
| <input type="checkbox"/> Enxada | <input type="checkbox"/> Saco plástico 50 Kg |
| <input type="checkbox"/> Equip. DCP | <input type="checkbox"/> Tabelas p/ registro de resultado |
| <input type="checkbox"/> Equip. Frasco de areia | <input type="checkbox"/> Talhadeira |
| <input type="checkbox"/> Espátula | <input type="checkbox"/> Trado |
| <input type="checkbox"/> Etiquetas | <input type="checkbox"/> Trena |
| <input type="checkbox"/> Extensão elétrica | <input type="checkbox"/> Vaselina |
| <input type="checkbox"/> Graxa | <input type="checkbox"/> Zipper Bag |

APÊNDICE H – Resultados dos Ensaios de Granulometria

Tabela 32 – Material passante no ensaio de Granulometria Com Defloculante

Tipo de Material (mm)	d (mm) entre	% Material Passante									
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	
Pedregulho grosso	20 e 60	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Pedregulho médio	20 e 6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Pedregulho fino	6 e 2	99,98	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,92	100,00	100,00	100,00
		99,94	99,78	99,99	99,99	99,97	99,80	99,96	99,99	99,99	99,95
Areia grossa	2 e 0,6	99,59	99,22	99,78	99,11	99,83	99,64	99,60	99,72	99,62	
Areia média	0,6 e 0,2	98,36	97,87	99,05	96,85	98,95	99,06	98,59	98,71	98,09	
		97,11	96,58	98,28	95,28	98,08	98,29	97,62	97,59	96,51	
		93,94	92,39	95,88	90,36	95,19	95,89	94,50	94,75	92,35	
Areia fina	0,2 e 0,06	89,77	85,04	91,45	82,56	92,75	91,40	92,96	90,45	87,57	
		84,47	75,53	84,72	73,13	84,24	84,93	83,92	84,85	81,14	
		73,93	67,10	76,38	58,75	74,05	74,70	75,19	77,56	80,26	
Silte	0,06 e 0,002	72,98	63,63	76,38	56,94	73,58	73,77	73,95	77,56	76,56	
		72,74	62,47	75,44	56,26	73,11	73,54	72,96	76,40	75,82	
		72,74	62,47	74,98	55,35	72,41	73,08	72,47	76,17	75,38	
		72,79	61,32	73,95	54,68	72,41	73,54	72,47	76,03	75,38	
		72,31	60,16	72,92	54,13	72,41	73,31	71,98	75,06	75,18	
		70,78	57,76	71,33	51,46	72,18	73,08	71,73	75,06	72,77	
		66,78	55,17	70,11	49,29	71,01	70,30	69,01	72,67	72,27	
		66,11	52,35	64,92	46,57	68,90	68,22	67,53	69,53	69,02	
		64,11	49,67	62,29	44,44	65,86	66,84	64,81	66,26	66,21	
61,01	47,18	59,26	42,50	64,46	64,53	63,43	65,30	64,89			
Argila	< 0,002	57,71	43,84	56,07	39,87	61,17	60,92	59,87	61,64	60,98	

Tabela 33 – Material passante no ensaio de Granulometria Sem Defloculante

Tipo de Material (mm)	d (mm) entre	% Material Passante									
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	
Pedregulho grosso	20 e 60	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Pedregulho médio	20 e 6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Pedregulho fino	6 e 2	99,98	100,00	100,00	100,00	100,00	99,92	100,00	100,00	100,00	100,00
		99,94	99,78	99,99	99,92	99,97	99,80	99,96	99,99	99,95	99,95
Areia grossa	2 e 0,6	97,80	87,59	94,08	95,49	98,14	95,80	98,06	97,80	94,92	
Areia média	0,6 e 0,2	84,81	63,14	73,33	78,22	85,85	80,65	86,86	85,22	77,43	
		68,69	51,97	57,45	65,72	72,78	67,38	75,78	73,41	63,95	
		42,51	36,57	36,64	45,55	50,35	46,59	52,37	52,54	44,70	
Areia fina	0,2 e 0,06	26,23	25,77	23,89	31,18	33,11	32,79	33,11	35,00	34,98	
		15,16	18,35	13,69	19,59	21,45	20,43	20,01	21,22	19,66	
		14,71	11,93	9,73	16,27	19,78	13,98	16,43	20,78	13,44	
Silte	0,06 e 0,002	13,99	10,77	8,79	15,14	14,63	10,28	13,72	17,32	12,95	
		11,13	8,46	8,09	11,74	9,25	7,51	9,02	17,09	9,74	
		6,47	6,15	4,58	10,61	6,21	5,43	3,59	11,56	5,55	
		2,89	4,60	3,42	3,83	5,51	3,35	3,34	3,26	2,35	
		1,15	3,91	2,71	1,56	3,87	2,89	3,09	3,14	0,87	
		0,84	3,82	2,08	1,34	3,40	2,20	2,50	3,14	0,77	
		0,74	2,89	1,85	0,89	3,40	2,01	2,01	3,02	0,52	
		0,51	2,01	1,66	0,70	1,43	1,87	1,02	2,91	0,52	
		0,55	1,89	1,61	0,52	1,20	1,83	0,77	2,68	0,52	
		0,62	1,85	0,47	0,16	0,77	1,76	0,74	2,47	0,27	
Argila	< 0,002	0,27	1,83	0,45	0,14	0,31	0,54	0,57	0,61	0,33	

APÊNDICE I – Resultados dos Ensaio de Massa Específica Real

Tabela 34 – Dados obtidos por meio do ensaio de massa específica real - Gs

	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
Picnômetro N°	14	13	5	6	8	1	4	14	5
Temperatura (°C)	23	23	23	22,8	23	23	22,8	22,6	22,6
Pic. + água (g)	674,65	669,53	673,67	672,46	673,34	669,07	646,19	674,69	673,71
Pic. + água + solo (g)	704,53	700,20	703,73	703,11	704,47	700,61	676,73	705,32	704,71
G (g/cm³)	2,69	2,81	2,71	2,61	2,68	2,74	2,60	2,61	2,67
	Gs (g/cm³) : 2,70			Gs (g/cm³) : 2,64			Gs (g/cm³) : 2,61		

	Ponto 4			Ponto 5			Ponto 6		
Picnômetro N°	10	16	3	3	8	14	16	1	10
Temperatura (°C)	22,6	22,8	22,8	21,8	22,2	22	22	22	22
Pic. + água (g)	640,42	666,80	665,48	665,58	673,43	674,75	666,87	669,17	640,49
Pic. + água + solo (g)	672,03	697,38	697,06	696,95	704,05	705,22	697,00	700,58	671,60
G (g/cm³)	2,75	2,60	2,74	2,83	2,71	2,69	2,69	2,89	2,84
	Gs (g/cm³) : 2,75			Gs (g/cm³) : 2,70			Gs (g/cm³) : 2,81		

	Ponto 7			Ponto 8			Ponto 9		
Picnômetro N°	9	4	6	6	9	16	3	2	4
Temperatura (°C)	22,2	22	22,1	21,9	21,8	21,8	22	22,2	22,2
Pic. + água (g)	673,19	646,28	672,57	672,60	673,23	666,89	665,56	694,38	646,26
Pic. + água + solo (g)	702,82	675,12	700,87	703,55	705,45	697,98	695,03	723,32	674,80
G (g/cm³)	2,87	2,74	2,65	2,66	2,85	2,68	2,89	2,80	2,73
	Gs (g/cm³) : 2,75			Gs (g/cm³) : 2,67			Gs (g/cm³) : 2,81		

APÊNDICE J – Dados Obtidos com o Ensaio de Permeabilidade de Porchet

Quadro 6 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 1

PONTO 1	
Cota	40 cm
Profundidade do furo	70
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	66,8
h2 (cm)	30,5
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0042
f (cm/h)	15,09
f (m/s)	0,000042

Quadro 7 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 2

PONTO 2	
Cota	40 cm
Profundidade do furo	70
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	55
h2 (cm)	27,5
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0036
f (cm/h)	13,05
f (m/s)	0,000036

Quadro 8 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 3

PONTO 3	
Cota	55 cm
Profundidade do furo	70
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	51,5
h2 (cm)	12
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0069
f (cm/h)	24,91
f (m/s)	0,000069

Quadro 9 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 4

PONTO 4	
Cota	40 cm
Profundidade do furo	70
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	55,5
h2 (cm)	19,5
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0053
f (cm/h)	19,06
f (m/s)	0,000053

Quadro 10 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 5

PONTO 5	
Cota	40 cm
Profundidade do furo	70
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	46
h2 (cm)	8,2
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0077
f (cm/h)	27,59
f (m/s)	0,000077

Quadro 11 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 6

PONTO 6	
Cota	48 cm
Profundidade do furo	70
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	50
h2 (cm)	23,8
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0038
f (cm/h)	13,68
f (m/s)	0,000038

Quadro 12 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 7

PONTO 7	
Cota	54 cm
Profundidade do furo	70
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	91
h2 (cm)	37
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0050
f (cm/h)	17,88
f (m/s)	0,000050

Quadro 13 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 8

PONTO 8	
Cota	35 cm
Profundidade do furo	90
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	57
h2 (cm)	6,5
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0095
f (cm/h)	34,37
f (m/s)	0,000095

Quadro 14 – Dados e resultados do ensaio de permeabilidade de Porchet – Ponto 9

PONTO 9	
Cota	52 cm
Profundidade do furo	70
Diâmetro (cm)	30
h1 (cm)	69
h2 (cm)	38
Tempo (s)	1200
f (cm/s)	0,0032
f (cm/h)	11,69
f (m/s)	0,000032

APÊNDICE K – Dados Obtidos com o Ensaio de Infiltração Duplo Anel

Tabela 35 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 1

PONTO 1			
Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	20	0,00	
300	22,8	2,80	0,000093
600	24,5	1,70	0,000057
900	26	1,50	0,000050
1200	27,8	1,80	0,000060
1500	29,3	1,50	0,000050
1800	30,7	1,40	0,000047
2100	32,3	1,60	0,000053
2400	33,5	1,20	0,000040
2700	34,8	1,30	0,000043
3000	36,3	1,50	0,000050
3300	37,5	1,20	0,000040
3600	38,7	1,20	0,000040

Gráfico 12 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 1

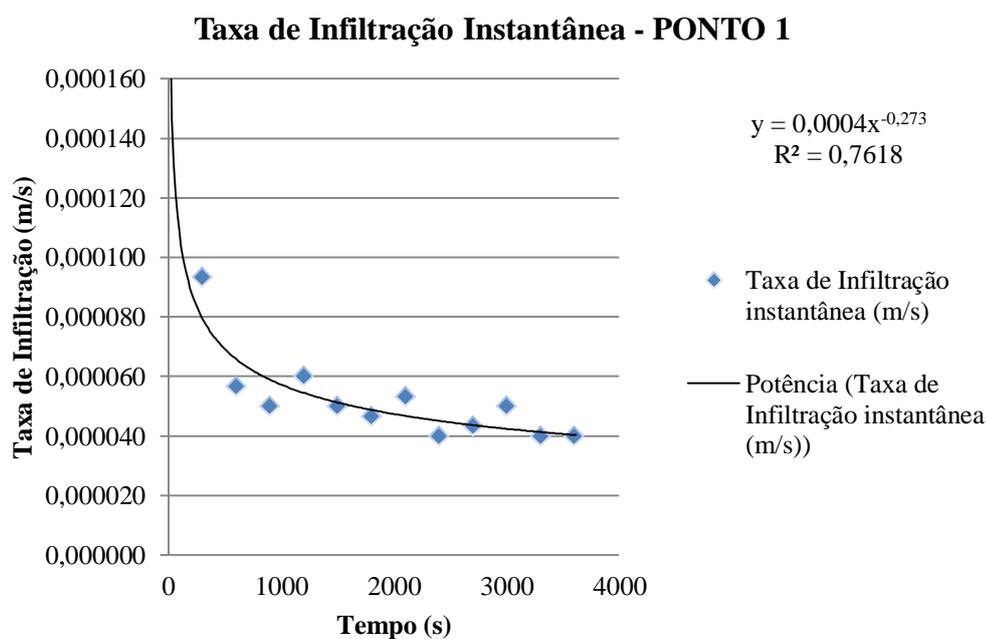


Tabela 36 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 2

PONTO 2			
Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	16,3	0,00	
300	19	2,70	0,000090
600	21	2,00	0,000067
900	22,5	1,50	0,000050
1200	23,5	1,00	0,000033
1500	24,9	1,40	0,000047
1800	25,6	0,70	0,000023
2100	26,9	1,30	0,000043
2400	28,2	1,30	0,000043
2700	29,4	1,20	0,000040
3000	30,5	1,10	0,000037
3300	31,6	1,10	0,000037
3600	32,7	1,10	0,000037

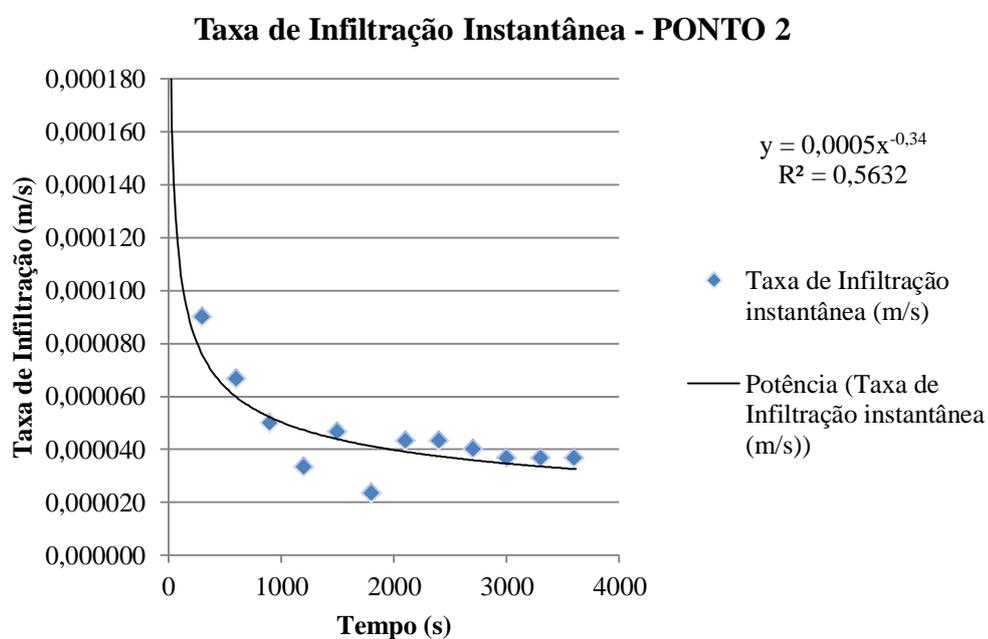
Gráfico 13 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 2

Tabela 37 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 3

PONTO 3			
Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	55,2	0,00	
300	57,9	2,70	0,000090
600	60	2,10	0,000070
900	61,5	1,50	0,000050
1200	63,6	2,10	0,000070
1500	65,6	2,00	0,000067
1800	67,3	1,70	0,000057
2100	69,1	1,80	0,000060
2400	70,9	1,80	0,000060
2700	72,4	1,50	0,000050
3000	73,9	1,50	0,000050
3300	75,2	1,30	0,000043
3600	76,5	1,30	0,000043

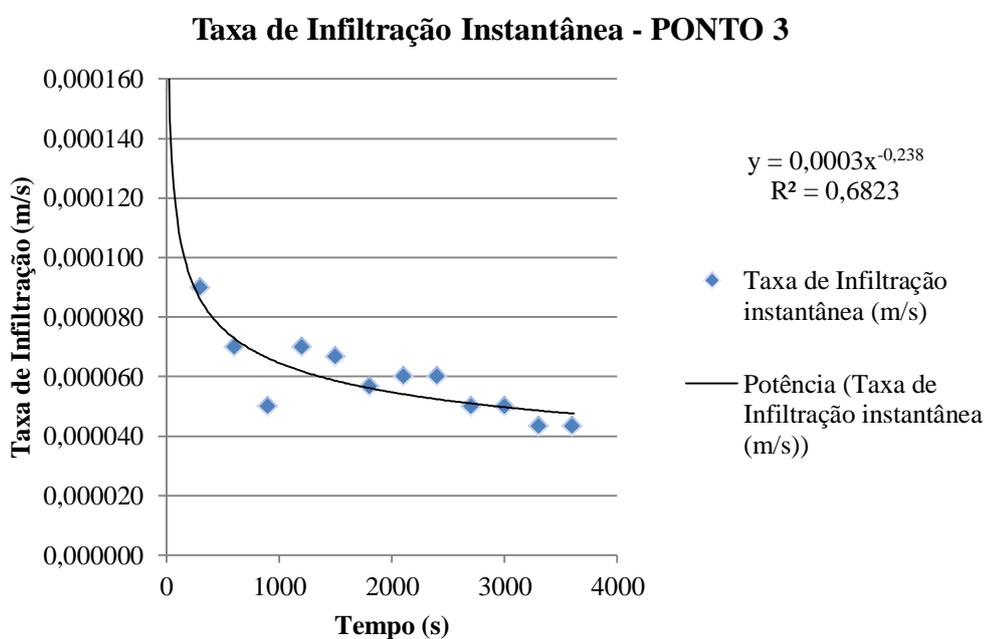
Gráfico 14 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 3

Tabela 38 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 4

PONTO 4			
Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	55	0,00	
300	56,4	1,40	0,000047
600	57,4	1,00	0,000033
900	58,3	0,90	0,000030
1200	59,2	0,90	0,000030
1500	60	0,80	0,000027
1800	60,8	0,80	0,000027
2100	61,5	0,70	0,000023
2400	62,3	0,80	0,000027
2700	62,8	0,50	0,000017
3000	63,5	0,70	0,000023
3300	64	0,50	0,000017
3600	64,5	0,50	0,000017

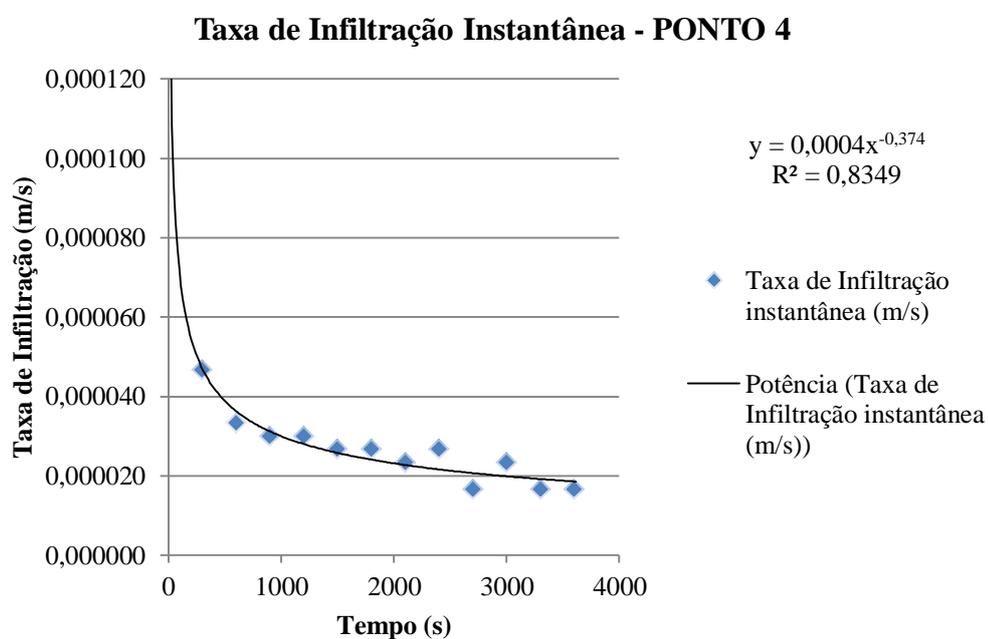
Gráfico 15 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 4

Tabela 39 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 5

PONTO 5			
Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	21,5	0,00	
300	23,8	2,30	0,000077
600	25,5	1,70	0,000057
900	27	1,50	0,000050
1200	28	1,00	0,000033
1500	29,3	1,30	0,000043
1800	30,4	1,10	0,000037
2100	31,4	1,00	0,000033
2400	32,4	1,00	0,000033
2700	33,5	1,10	0,000037
3000	34,5	1,00	0,000033
3300	35,5	1,00	0,000033
3600	36,5	1,00	0,000033

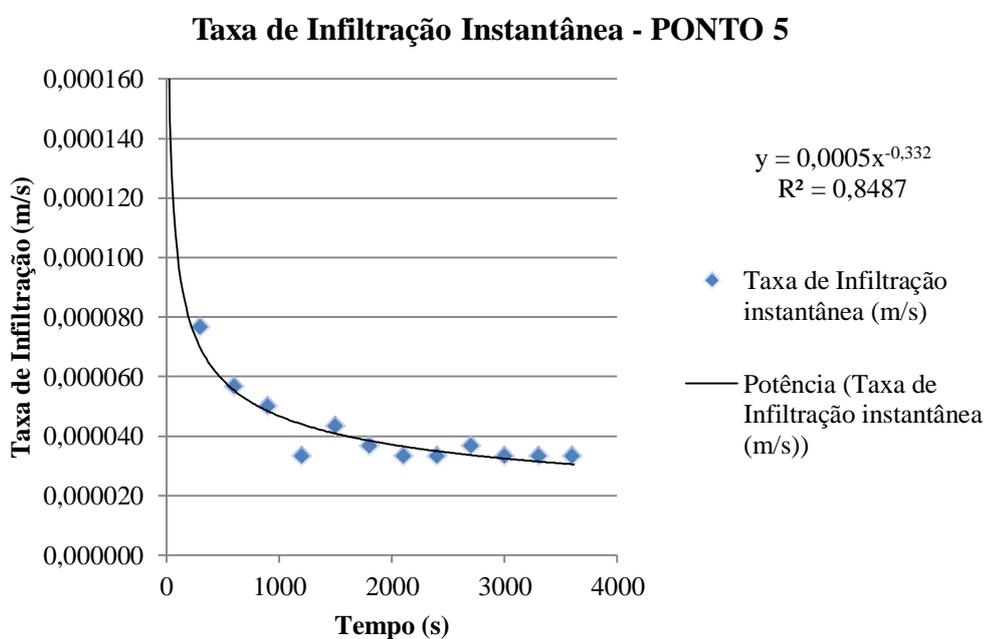
Gráfico 16 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 5

Tabela 40 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 6

PONTO 6			
Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	22,7	0,00	
300	26,5	3,80	0,000127
600	31,4	4,90	0,000163
900	34,4	3,00	0,000100
1200	37,7	3,30	0,000110
1500	40,7	3,00	0,000100
1800	43,9	3,20	0,000107
2100	46,9	3,00	0,000100
2400	50	3,10	0,000103
2700	52,3	2,30	0,000077
3000	55,3	3,00	0,000100
3300	57,9	2,60	0,000087
3600	60,6	2,70	0,000090

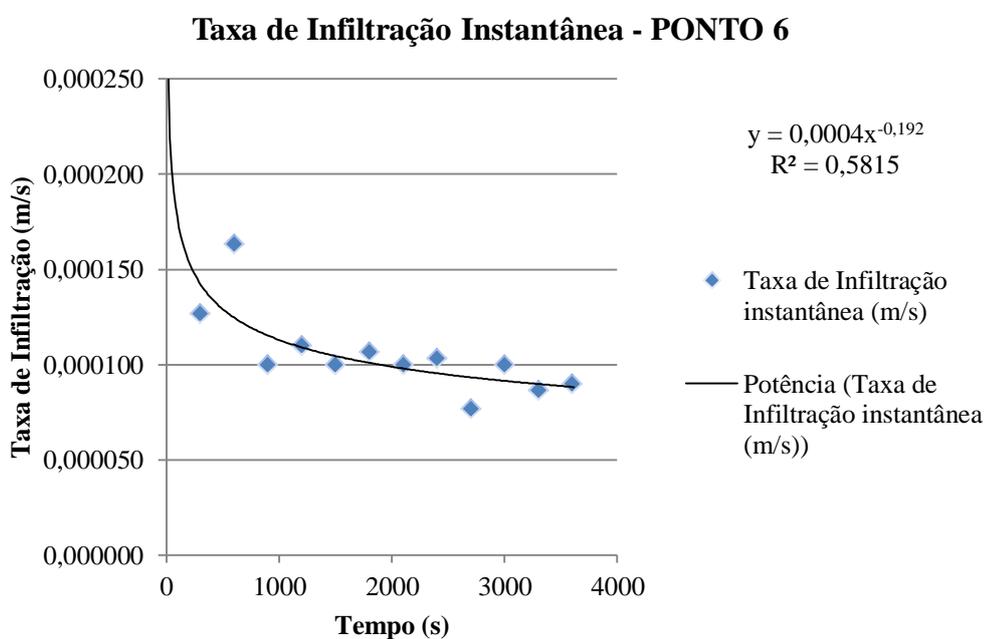
Gráfico 17 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 6

Tabela 41 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 7

PONTO 7			
Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	67,8	0,00	
300	68,7	0,90	0,000030
600	69,1	0,40	0,000013
900	69,6	0,50	0,000017
1200	70	0,40	0,000013
1500	70,2	0,20	0,000007
1800	70,4	0,20	0,000007
2100	70,6	0,20	0,000007
2400	70,9	0,30	0,000010
2700	71,1	0,20	0,000007
3000	71,2	0,10	0,000003
3300	71,4	0,20	0,000007
3600	71,6	0,20	0,000007

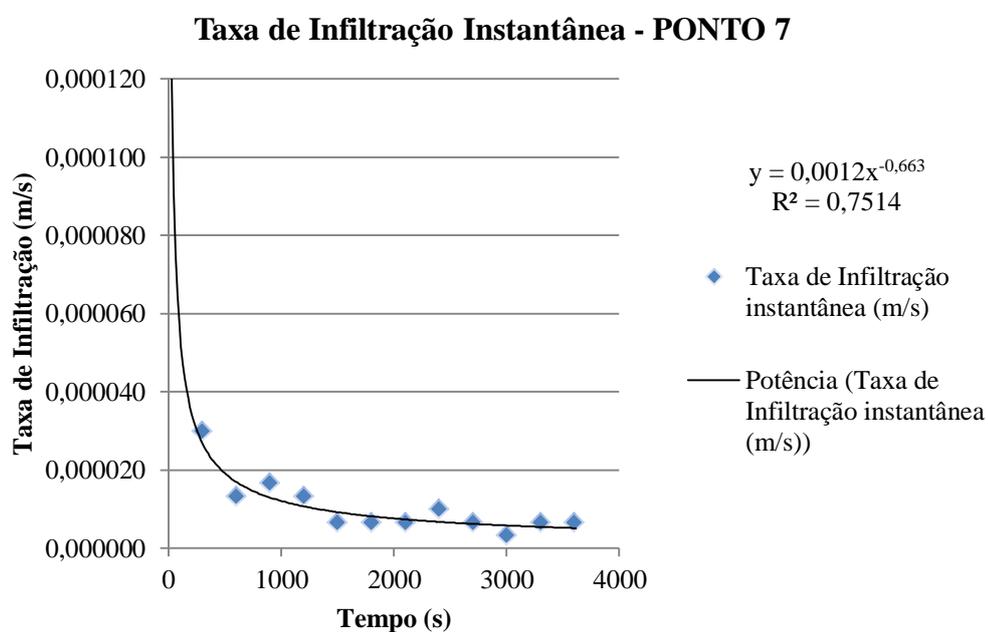
Gráfico 18 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 7

Tabela 42 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 8

PONTO 8			
Tempo (s)	Medida (cm)	Varição (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	20,5	0,00	
300	24,5	4,00	0,000133
600	27,5	3,00	0,000100
900	30	2,50	0,000083
1200	31	1,00	0,000033
1500	33	2,00	0,000067
1800	35,5	2,50	0,000083
2100	37,5	2,00	0,000067
2400	39	1,50	0,000050
2700	41	2,00	0,000067
3000	42,7	1,70	0,000057
3300	44,2	1,50	0,000050
3600	45,5	1,30	0,000043

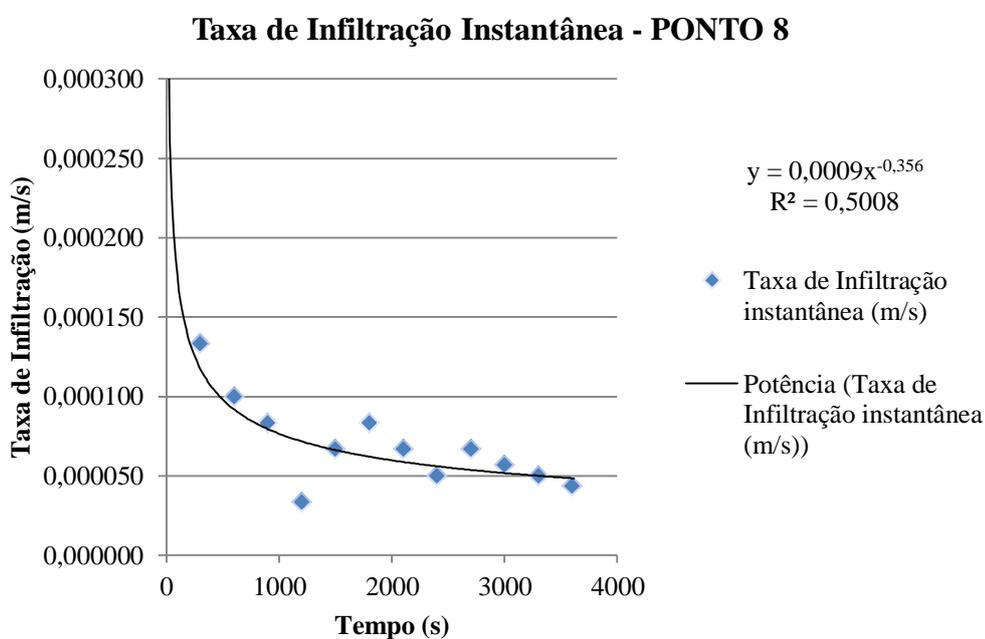
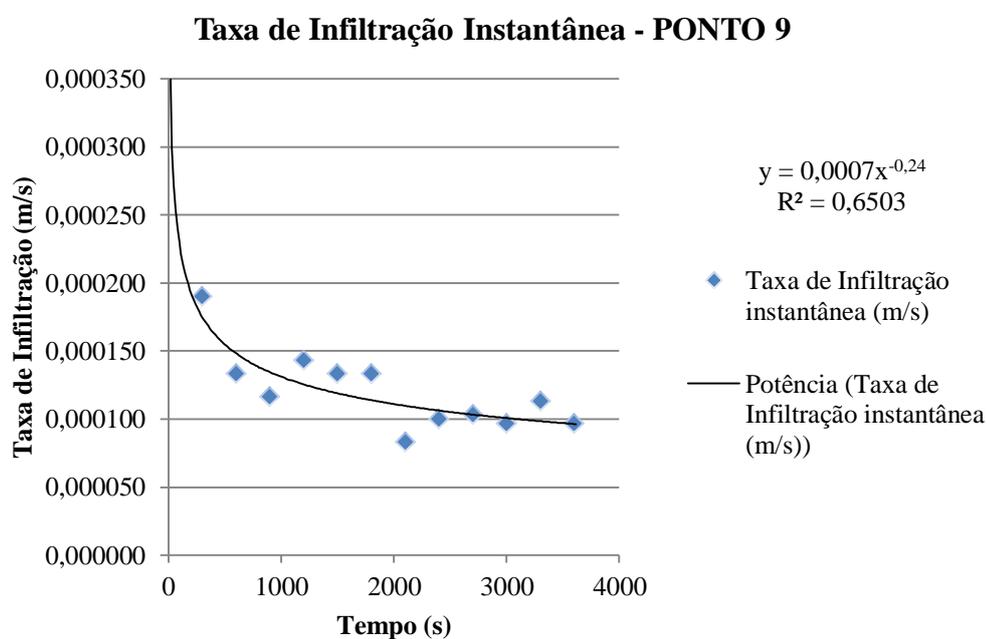
Gráfico 19 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 8

Tabela 43 – Dados e resultados do ensaio de infiltração – Ponto 9

PONTO 9			
Tempo (s)	Medida (cm)	Variação (cm)	Taxa de Infiltração instantânea (m/s)
0	21,3	0,00	
300	27	5,70	0,000190
600	31	4,00	0,000133
900	34,5	3,50	0,000117
1200	38,8	4,30	0,000143
1500	42,8	4,00	0,000133
1800	46,8	4,00	0,000133
2100	49,3	2,50	0,000083
2400	52,3	3,00	0,000100
2700	55,4	3,10	0,000103
3000	58,3	2,90	0,000097
3300	61,7	3,40	0,000113
3600	64,6	2,90	0,000097

Gráfico 20 – Taxa de infiltração vs tempo – Ponto 9

APÊNDICE L – Dados e Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência

Tabela 44 – Valores de Módulo de Resiliência

σ_3 (kPa)	σ_D (kPa)	Módulo de Resiliência M_r (Mpa)			
		CP1	CP2	CP3	CP4
0,0414	0,0138	40,94	29,05	14,72	28,32
0,0414	0,0276	34,65	24,47	16,71	35,97
0,0414	0,0414	36,27	23,73	19,32	43,73
0,0414	0,0552	37,45	26,79	22,15	48,65
0,0414	0,0689	40,92	30,79	20,61	56,11
0,0276	0,0138	50,57	42,6	18,32	46,83
0,0276	0,0276	40,18	38,06	19,42	43,83
0,0276	0,0414	38,46	37,69	21,34	47,9
0,0276	0,0552	40,22	39,02	22,83	56,49
0,0276	0,0689	44,17	47,22	25,56	60,71
0,0138	0,0138	50,23	43,33	19,79	59,2
0,0138	0,0276	43,39	42,98	20,82	55,34
0,0138	0,0414	43,08		22,52	54,2
0,0138	0,0552	45,43		24,65	60,34
0,0138	0,0689	49,86			67,84
Média		42,39	35,48	20,63	51,03
Desvi. Pad.		4,82	7,79	2,82	9,98
C.V.		11%	22%	14%	20%

APÊNDICE M – Resultados e Dados dos ensaios para Correlações entre CBR e DCP

Tabela 45 – Valores da umidade e densidade dos corpos de prova compactados

Amostra	W (%)	γ_s (g/cm ³)	Amostra	W (%)	γ_s (g/cm ³)
CPsat 01	21	1,21	CP 01	21,7	1,19
CPsat 02	24,7	1,35	CP 02	25,8	1,39
CPsat 03	28,7	1,38	CP 03	29,6	1,38
CPsat 04	31,9	1,35	CP 04	30,8	1,37
CPsat 05	35	1,3	CP 05	35,3	1,3
CPsat 06	39	1,23	CP 06	38,7	1,24

Tabela 46 – Resultados dos ensaios de CBR (I.S.C.)

CBR - Penetração							
Tempo (min)	Penet (mm)	Leitura	Leitura (mm)	Carga (Kgf)	Pressão (Mpa)		I.S.C. (%)
					Calculada	Corrigida	
CP 01							
2	2,54	180	0,18	352,79	1,773	1,77	25,69
4	5,08	255	0,255	499,79	2,511	2,51	24,26
CP 02							
2	2,54	177	0,177	346,91	1,743	1,74	25,26
4	5,08	221	0,221	433,15	2,176	2,18	21,03
CP 03							
2	2,54	47	0,047	92,12	0,463	0,46	6,71
4	5,08	76	0,076	148,96	0,748	0,75	7,23
CP 04							
2	2,54	18	0,018	35,28	0,177	0,18	2,57
4	5,08	30	0,03	58,80	0,295	0,30	2,85
CPsat 01							
2	2,54	16	0,016	31,36	0,158	0,16	2,28
4	5,08	20	0,02	39,20	0,197	0,20	1,90
CPsat 02							
2	2,54	89	0,089	174,44	0,876	0,88	12,70
4	5,08	99	0,099	194,04	0,975	0,97	9,42
CPsat 03							
2	2,54	105	0,105	205,80	1,034	1,03	14,99
4	5,08	103	0,135	264,59	1,329	1,33	12,85
CPsat 04							
2	2,54	55	0,055	107,80	0,542	0,54	7,85
4	5,08	85	0,092	180,32	0,906	0,91	8,75

Tabela 47 – Dados e resultados ensaio de DCP nos CPs sem saturação

DCP Solo sem Saturação							
CP 01		CP 02		CP 03		CP 04	
Cilindro 07		Cilindro 017		Cilindro 03		Cilindro 09	
Nº Golpe	mm/golpe	Nº Golpe	mm/golpe	Nº Golpe	mm/golpe	Nº Golpe	mm/golpe
0	0	0	0	0	0	0	0
1	26	1	21	1	40	1	63
2	5	2	15	2	35	2	
3	9	3	14				
		4	15				
Média	13,33	Média	16,25	Média	37,50	Média	63,00
Prof. (mm)	40	Prof. (mm)	65	Prof. (mm)	75	Prof. (mm)	63

Tabela 48 – Dados e resultados ensaio de DCP nos CPs com saturação de 96h

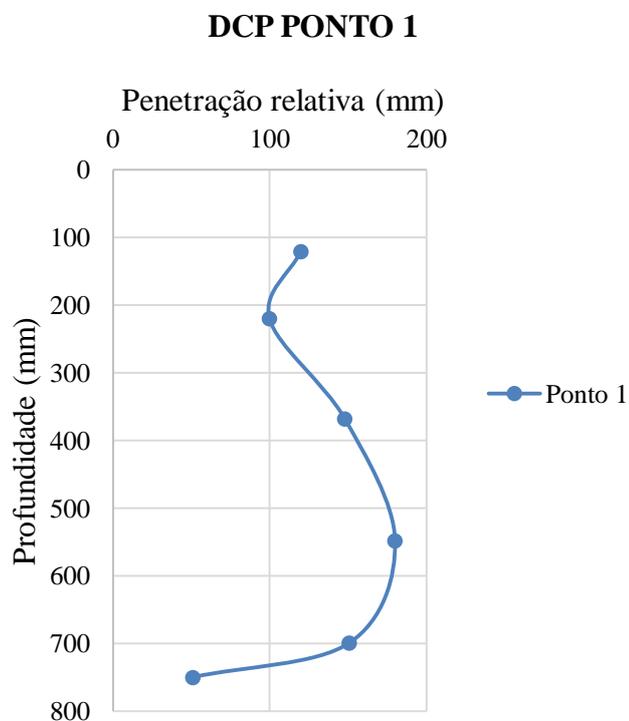
DCP Com Saturação 96 h							
CPsat 01		CPsat 02		CPsat 03		CPsat 04	
Cilindro 10		Cilindro 12		Cilindro 24		Cilindro 15	
Nº Golpe	mm/golpe	Nº Golpe	mm/golpe	Nº Golpe	mm/golpe	Nº Golpe	mm/golpe
0	0	0	0	0	0	0	0
1	80	1	59	1	48	1	57
					30		
Média	80,00	Média	59,00	Média	39,00	Média	57,00
Prof. (mm)	80	Prof. (mm)	59	Prof. (mm)	78	Prof. (mm)	57

APÊNDICE N – Dados Obtidos com o Ensaio de Penetração Dinâmica de Cone (DCP) Executados em Campo

Quadro 15 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 1

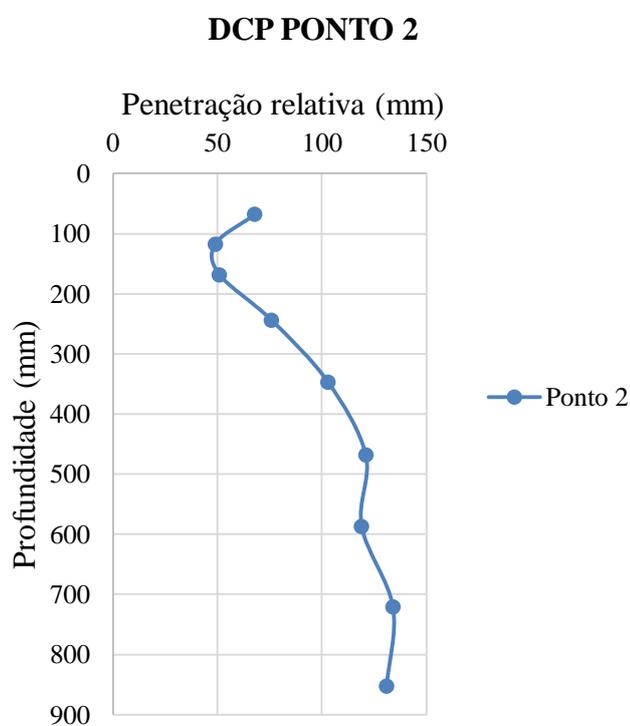
Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	120	120
2	220	100
3	368	148
4	548	180
5	699	151
6	750	51
Média (mm/golpe) =		121,6
Umidade do Solo (%) =		46

Gráfico 21 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 1



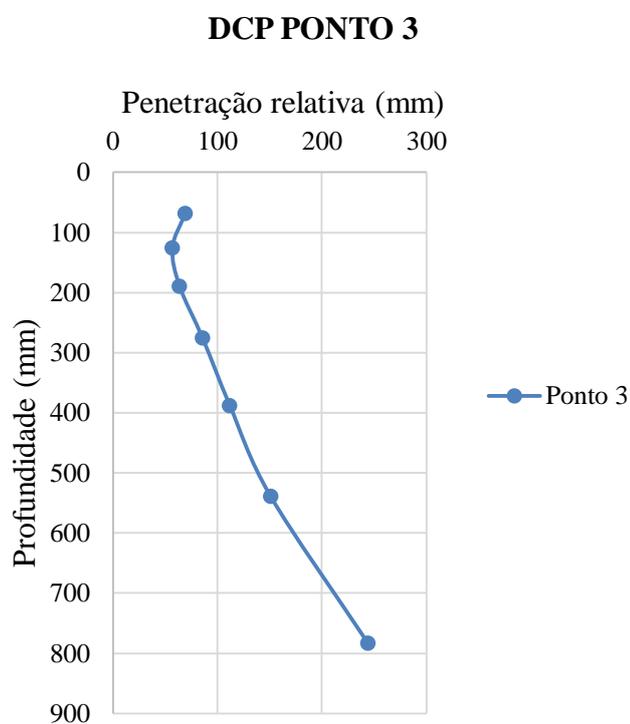
Quadro 16 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 2

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	68	68
2	117	49
3	168	51
4	244	76
5	347	103
6	468	121
7	587	119
8	721	134
9	852	131
Média (mm/golpe) =		88,4
Umidade do Solo (%) =		35

Gráfico 22 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 2

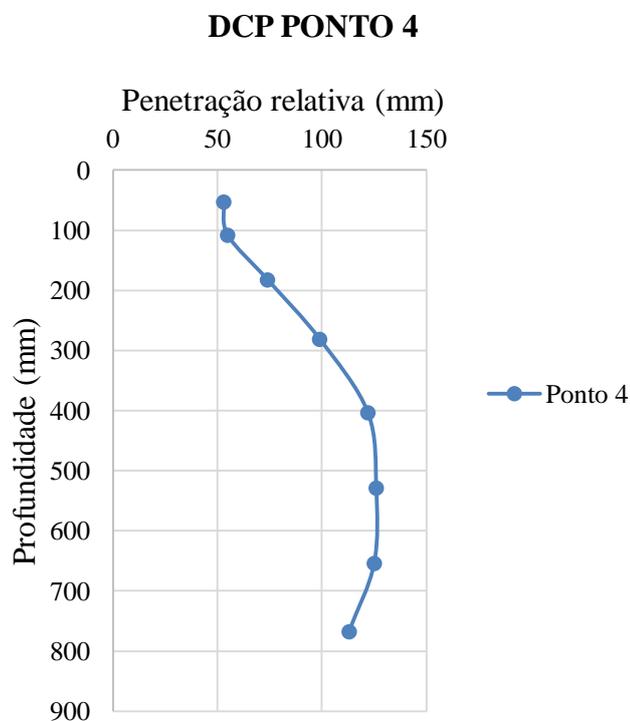
Quadro 17 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 3

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	69	69
2	126	57
3	190	64
4	276	86
5	388	112
6	539	151
7	783	244
Média (mm/golpe) =		83,9
Umidade do Solo (%) =		37

Gráfico 23 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 3

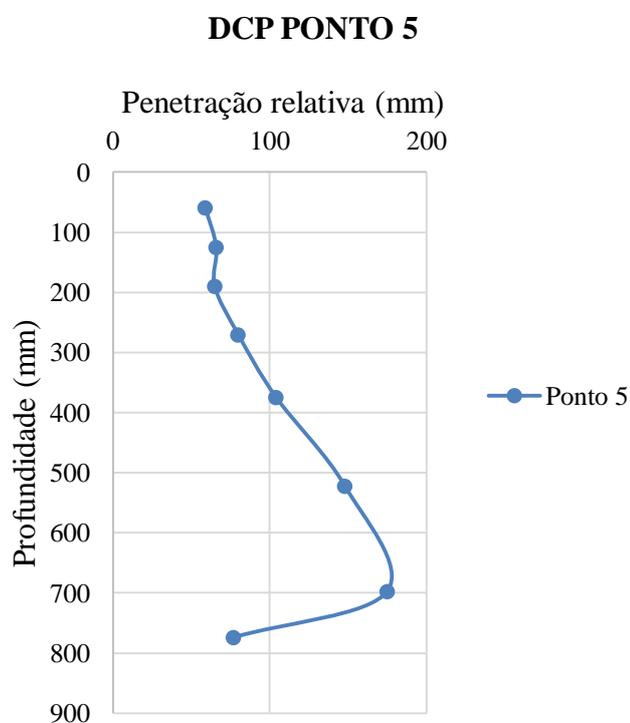
Quadro 18 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 4

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	53	53
2	108	55
3	182	74
4	281	99
5	403	122
6	529	126
7	654	125
8	767	113
Média (mm/golpe) =		90,7
Umidade do Solo (%) =		32

Gráfico 24 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 4

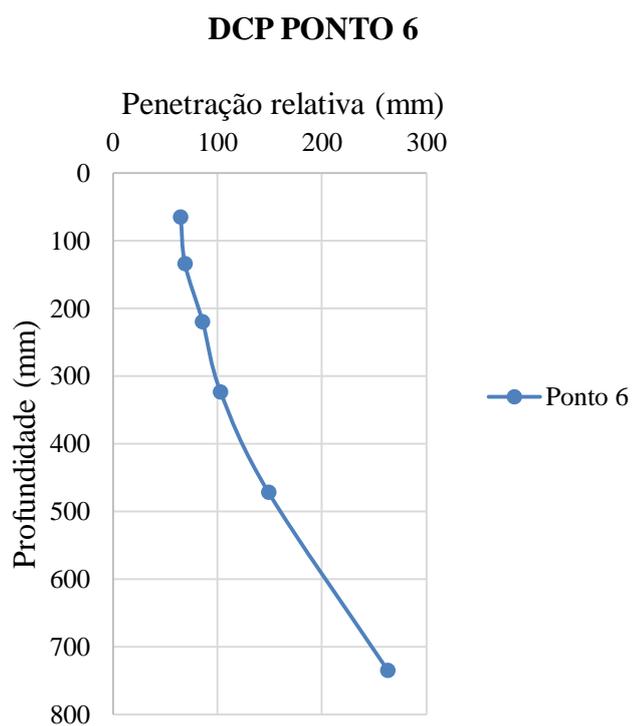
Quadro 19 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 5

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	59	59
2	125	66
3	190	65
4	270	80
5	374	104
6	522	148
7	697	175
8	774	77
Média (mm/golpe) =		102,3
Umidade do Solo (%) =		42

Gráfico 25 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 5

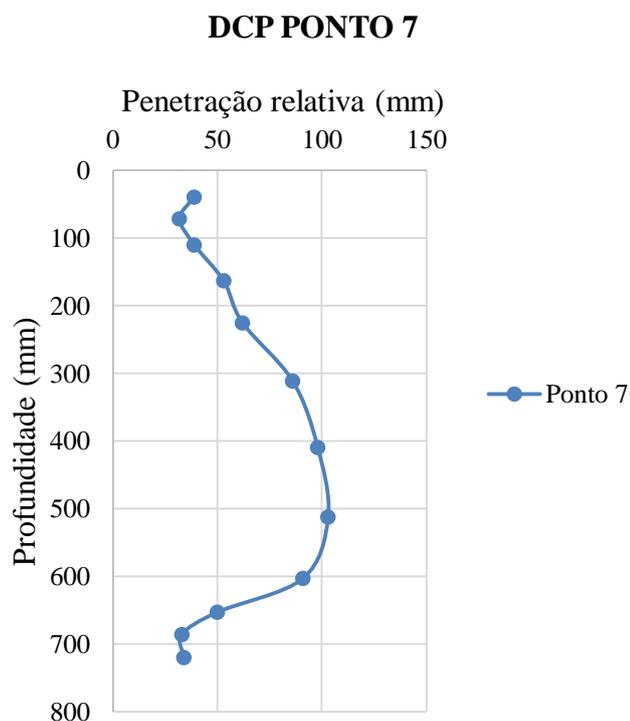
Quadro 20 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 6

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	65	65
2	134	69
3	220	86
4	323	103
5	472	149
6	735	263
Média (mm/golpe) =		83,7
Umidade do Solo (%) =		38

Gráfico 26 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 6

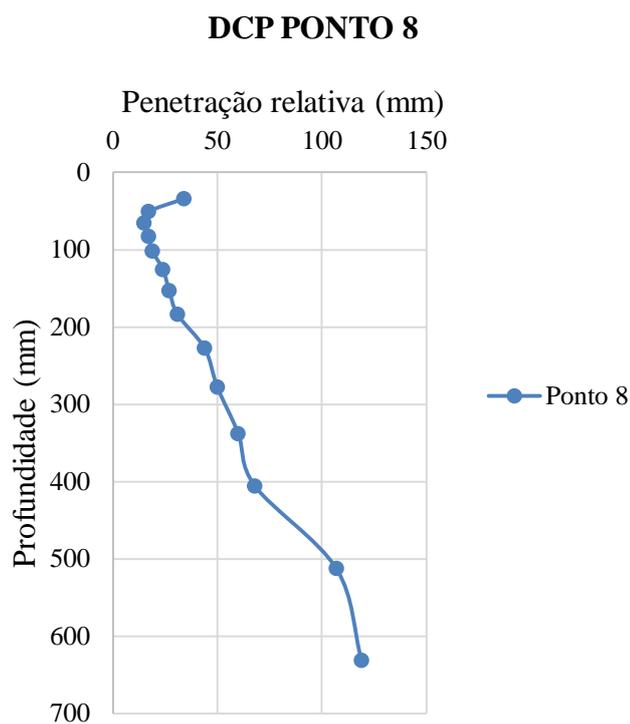
Quadro 21 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 7

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	39	39
2	71	32
3	110	39
4	163	53
5	225	62
6	311	86
7	409	98
8	512	103
9	603	91
10	653	50
11	686	33
12	720	34
Média (mm/golpe) =		68,5
Umidade do Solo (%) =		36

Gráfico 27 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 7

Quadro 22 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 8

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	34	34
2	51	17
3	66	15
4	83	17
5	102	19
6	126	24
7	153	27
8	184	31
9	228	44
10	278	50
11	338	60
12	406	68
13	513	107
14	632	119
Média (mm/golpe) =		49,6
Umidade do Solo (%) =		35

Gráfico 28 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 8

Quadro 23 – Dados do ensaio de DCP em campo – Ponto 9

Golpes	Penetração Total (mm)	Penetração Relativa (mm/golpe)
0	0	0
1	47	47
2	106	59
3	178	72
4	242	64
5	304	62
6	382	78
7	459	77
8	586	127
9	848	262
Média (mm/golpe) =		68,7
Umidade do Solo (%) =		33

Gráfico 29 – Profundidade vs penetração relativa DCP – Ponto 9